

背景画像上でのペトリネットシミュレーション構築法による地震防災計画の動的支援研究

著者	木俣 昇
著者別表示	Kimata Noboru
雑誌名	平成17(2005)年度 科学研究費補助金 基盤研究(C) 研究成果報告書
巻	2004-2005
ページ	114p.
発行年	2006-03
URL	http://doi.org/10.24517/00052608



背景画像上でのペトリネットシミュレーション構築法による 地震防災計画の動的支援研究

(課題番号: 16510111)

平成16年度～平成17年度科学研究費補助金(基盤研究 (C) (2))
研 究 成 果 報 告 書

平成 18 年 3 月

研究代表者 木 俣 昇
(金沢大学自然科学研究科 教授)

金沢大学附属図書館



0800-04236-0

はしがき

防災計画が他の公共計画と大きく異なる点は、計画目標年次の不在性にある。特に、直下型地震の不安を抱えるわが国の地震防災計画においては、この認識が重要となる。その一方で、計画の実現化には時間が掛かり、この点では地震防災計画とて同じである。災害予防計画である耐震・耐火化計画には、多大な費用と長い時間が掛かるが、自然災害である地震はその完了を待つてはくれない。ここから導かれることは、現時点で実行性と実効性を持つシステムを常に準備すると同時に、そのシステムに対して、日々点検を行い、再構成をする努力を怠らないということに尽きる。本研究のテーマである地震防災計画の動的支援とは、この点検・再構成の実践支援である。具体的には、著者等が取り組んできた背景画像上でのペトリネットシミュレーション構築法を支援システムとして、現時点の災害応急対応システムを基礎に、それらの点検・再構成の実践形式の展開と検討を目的としている。

研究開始当初は、動的支援という“動的”とは、災害応急対応システムが発効し、事態が進行する動的性という意味に使用されていたが、最終的には、われわれが日常生活を送る通常時時間軸と、発災を起点とする災害時時間軸の交差する中での“動的”支援へと拡大されることとなる。この認識の獲得は、著者等にとっては、本支援方式の可能性に確信を与えると同時に、今後の研究の方向性を示すものとなっており、本研究の遂行に際して、援助を頂いた日本学術振興会に感謝の意を表します。

本研究では、従来の研究室レベルでの実践から、始めて市民レベルでの利用実験に踏み込めた。本研究の主旨も、防災計画に係わる人々自身による支援システムの運用下での点検・再構成の実行にある。そのためには、支援システムの提供化に関する研究が、さらに必要と考えている。最後に、研究分担者の皆さんと研究協力者の学生諸君に感謝します。

平成18年3月20日

木俣 昇

研究組織

研究代表者 : 木俣 昇 (金沢大学自然科学研究科教授)
研究分担者 : 高山純一 (金沢大学自然科学研究科教授)
研究分担者 : 近田康夫 (金沢大学自然科学研究科教授)
研究分担者 : 二神 透 (愛媛大学総合情報メディアセンター講師)

交付決定額

(金額単位: 千円)

	直接経費	間接経費	合 計
平成16年度	2, 100	0	2, 100
平成17年度	1, 700	0	1, 700
総 計	3, 800	0	3, 800

研究発表

(1) 学会誌等

- 1) 木俣昇, 中村彰彦: 交通流ペトリネットシミュレータにおける背景画像上でのデータベース化に関する研究, 土木計画学研究・論文集 Vol. 21, 51-62, 2004
- 2) 二神透, 木俣昇: 倒壊建物と炎上車両を考慮した地震火災危険分析 土木計画学研究・論文集, Vol. 21, 341-346, 2004
- 3) 木俣昇, 曾根岳志: ペトリネットによる背景画像上での建物避難シナリオのシミュレーション研究, 土木計画学研究・論文集 Vol. 22, 53-64, 2005
- 4) 二神透, 木俣昇: 中山間地域の救急・避難計画のためのシナリオシミュレーションの開発, 土木計画学研究・論文集, Vol. 22, 89-96, 2005.
- 5) 二神透, 木俣昇: 背景画像上での避難ペトリネットシミュレーションへのプローブ技術の活用化研究, 土木情報利用技術論文集, No. 13, 33-40, 2005
- 6) 中山晶一郎, 高山純一, 他2名: 旅行時間の不確実性を考慮した交通ネットワーク均衡モデル, 土木学会論文集, No. 772, IV-65, 67-77, 2004.
- 7) 中山晶一郎, 高山純一, 長尾一輝, 笠嶋崇弘: 旅行時間の不確実性を考慮した交通ネットワーク均衡モデル, 土木学会論文集, No. 772, IV-65, 67-77, 2004.
- 8) Nakayama, S. and J. Takayama: A Traffic Equilibrium Model with Probabilistic Flows for Evaluating the Network's Uncertainty, Proceedings of the 10th World Conference on Transport Research, 2004 on CD-ROM.
- 9) Yasuo CHIKATA, etc.: Highway RC pier design assistance by selforganizing map, 3rd CJK-OSM, 2004
- 10) 阿曾克司, 近田康夫: 拡張したマハラノビス距離の橋梁総合健全度評価への適用, 構造工学論文集 Vol.52 (印刷中)

(2) 口頭発表

- 1) 堀浩三, 木俣昇, 2名: バス優先レーン策における一般車規制に関するペトリネットシミュレーションについて, 土木学会中部支部・研究発表会講演概要集, 313-314, 2004.
- 2) 松井竜太郎, 木俣昇: ペトリネットによる背景画像上でのバスターミナルバース運用代替案シミュレーション研究, 土木計画学研究・講演集, 30巻 (CD-ROM) No.188, 2004.
- 3) 曾根岳志, 木俣昇: ペトリネットによる背景画像上での建物内避難シナリオのシミュレーション研究, 土木計画学研究・講演集, 30巻 (CD-ROM), No.201, 2004.
- 4) 堀浩三, 木俣昇: 背景画像上での地震時緊急車両走行のペトリネットシミュレーション開発, 土木計画学研究・講演集, 30巻 (CD-ROM), No.317, 2004.
- 5) 高野龍一, 曾根岳志, 木俣昇: ペトリネットによる背景画像上での地震時避難シナリオのシミュレーション法, 土木学会中部支部・研究発表会講演概要集, 419-420, 2005.

- 6) 二神透, 木俣昇: 中山間地域の救急・避難計画支援のための情報システム開発, 土木情報利用技術講演集, Vol. 29, 29-32, 2004.
- 7) 二神透, 木俣昇: 中山間地域の救急・避難計画支援のためのシナリオシミュレーションの開発, 土木計画学研究・講演集, 30 巻 (CD-ROM), No.202, 2004.
- 8) 上埜一樹, 堀浩三, 木俣昇: ペトリネットシミュレータによる背景画像上での緊急車両の走行性考察, 土木学会中部支部・研究発表会講演概要集, 419-420, 2005.
- 9) 北尾豪, 松井竜太郎, 木俣昇: 交通流ペトリネットシミュレータの実用性の向上化に関する考察, 土木学会中部支部・研究発表会講演概要集, 47-448, 2005.
- 10) 堀浩三, 木俣昇: ペトリネットシミュレータによる背景画像上での地震時緊急路の点検・構築支援システム, 土木計画学研究・講演集, 32 巻 CD-ROM, No.40, 2005.
- 11) 南部佳郎, 木俣昇: 信号交差点部における緊急車両走行支援のペトリネットシミュレーション研究, 土木学会中部支部・研究発表会講演概要集, 363-364, 2006.
- 12) 寺西伸太郎, 木俣昇: 地震時火災避難計画シナリオのペトリネットシミュレーション開発, 土木学会中部支部・研究発表会講演概要集, 365-366, 2006.
- 13) 二神透, 木俣昇: 火災延焼シミュレータを用いた防災樹木整備による防災まちづくり支援, 土木計画学研究・講演集, Vol.32, CD-ROM, No.363, 2005.
- 14) 二神透, 木俣昇, 寺田一雄: ペトリネットシミュレータを用いた中山間地域の避難計画支援に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.32, CD-ROM, No.213, 2005.
- 15) 二神透, 木俣昇: ペトリネット・シミュレーションを用いた中山間地域の災害孤立対策に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.32, CD-ROM, No.186, 2005.
- 16) 高山純一, 中山晶一郎, 島崎翔子: ITS による経路誘導を活用した緊急車両の走行支援に関する研究, 土木学会年次学術講演概要集, 59 (CD-ROM), IV-406, 2004.
- 17) 所俊宏, 高山純一, 中山晶一郎: 時間信頼性を考慮した緊急車両の経路誘導・信号制御の導入効果に関する研究, 土木学会中部支部・研究発表会講演概要集, 383-384, 2005.
- 18) 小林慧美, 中山晶一郎, 高山純一: 適応的マルチエージェントを用いた災害時における交通シミュレーションモデルの構築, 土木学会中部支部・研究発表会講演概要集, 423-424, 2005.
- 19) 矢島梓, 高山純一, 中山晶一郎: 適応的マルチエージェントを用いた災害時における交通情報提供に関する影響評価, 土木学会中部支部・研究発表会講演概要集, 369-370, 2006.
- 20) 田中健太郎, 高山純一: ITS を活用した災害時における緊急車両の走行支援に関する研究, 土木学会中部支部・研究発表会講演概要集, 371-372, 2006.
- 21) 山本紘久, 近田康夫, 他 2 名: 人工生命技術を用いた道路橋 RC 橋脚の詳細設計支援, 土木学会年次学術講演概要集, 59 (CD-ROM), 1-247, 2004.
- 22) 近田康夫, 中谷武弘, 他: GA と SOM による RC 橋脚耐震設計支援, 土木情報利用技術講演集 Vol.30, 175-182, 2005.
- 23) 二神透, 廣田卓也: 倒壊建物を考慮した火災延焼シミュレーションの開発, 土木学会四国支部第 10 回技術研究発表会, 214-215, 2004.

背景画像上でのペトリネットシミュレーション構築法による 地震防災計画の支援研究

目 次

第1章 序論	1
1. 1 研究課題と方法論	1
1. 2 本研究の構成	2
第2章 ペトリネットシミュレータによる動的点検・構築支援の基本フレーム	4
2. 1 まえがき	4
2. 2 ペトリネットによる防災計画シナリオの基本表現法	4
2. 3 ペトリネットによる動的点検構築支援の実践形式	9
2. 4 参考文献	15
第3章 緊急車両走行のミクロペトリネットシミュレーション開発	16
3. 1 まえがき	16
3. 2 交通流のペトリネットシミュレーション概説	16
3. 3 緊急車両走行のミクロペトリネット構成	21
3. 4 一般車による緊急車両走行阻害のシミュレーション実行	33
3. 5 緊急車両走行性の動的点検・構築支援実践	39
3. 6 あとがき	44
3. 7 参考文献	45
第4章 地震時消防防災システムの動的点検・構築の支援研究	46
4. 1 まえがき	46
4. 2 消防防災システムの点検・構築支援のための基本システム準備	47
4. 3 通常時消防防災システムの動的点検支援実践	54
4. 4 地震時消防防災システムの動的点検支援実践	62
4. 5 あとがき	70
4. 6 参考文献	70
第5章 地震時市街地避難計画シナリオのペトリネットシミュレーション研究	71
5. 1 まえがき	71
5. 2 市街地避難計画シナリオの基本部分ネット構成	71
5. 3 地震火災延焼シナリオのペトリネット化	77
5. 4 地震時市街地避難計画シナリオのシミュレーション実行	83
5. 5 あとがき	91
5. 6 参考文献	92

第6章	ペトリネットシミュレータを用いた中山間地の避難計画支援に関する研究	93
6. 1	まえがき	93
6. 2	ペトリネットによる避難シミュレーションの概説	93
6. 3	避難経路ネット図のプローブデータによる自動作成	96
6. 4	中山間地避難計画支援への適用研究	98
6. 5	あとがき	105
6. 6	参考文献	105
第7章	結言	107

第1章 序 論

1. 1 研究課題と方法論

地震防災計画は、図 1-1 に示すように、＜被害想定図＞を基に、「災害予防計画」、「災害応急対応計画」、および「災害復旧計画」を3つの柱として作成される。そして、それぞれが相互に関連し合う形で整備される公共計画である。地震防災計画が他の公共計画と大きく異なる点は、計画目標年次の不在性にある。図 1-1 には、このことの時間軸上での認識図を示している。

「災害予防計画」の1つである耐震・耐火計画は、可能な限り早期の計画目標年次の設定が望まれるが、費用と時間を掛けて遂行され、進捗していく計画である。防災訓練計画も訓練の繰り返しによって、進捗する性質の計画であり、完了という意味での計画目標年次をもたない。しかし、これらの計画は、遂行されることに伴い、通常的时间軸上で進捗し、状況改善させていくものである。

一方、「災害応急対応計画」と「災害復旧計画」は、発災した時点から始まる災害時時間軸上で発効するものであり、この開始時点は、地震予知の現状から不確定なものであり、その意味で計画目標年次は不在である。強いていえば、近々時である。

本研究でのテーマは、この認識を出発点として、「災害応急対応計画」の中の＜消防防災計画＞と＜避難計画＞の取り扱いシステムの提案と、その実践による具体的な議論の展開にある。その方法論は、著者等が開発・展開してきたペトリネットシミュレータに基礎を置くもので、基本アプローチ法は、図 1-2 に示すようなものである。

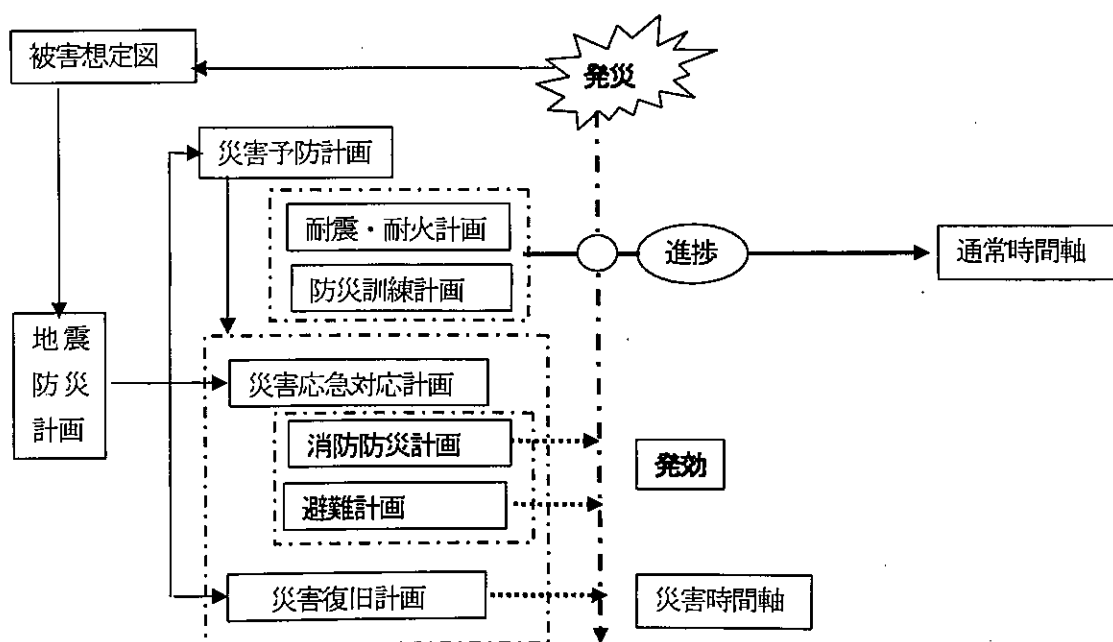


図 1-1 地震防災計画の基本構成と時間軸認識

まず、上述したように、これらの計画では計画目標年次は不在であり、常に近々時の発効が求められる。そのことより、消防防災システムであれ、避難計画シナリオであれ、近々時での実行性と実効性を担保し、それらの常なる点検により再構成を行い、それらの実行性と実効性の改善・向上を図るという展開が必要となる。このプロセスの実践には、対象系である消防防災システムや避難計画シナリオのシステム表現化力を有し、かつ、それらの地震時での動的点検と再構築の実行性を備えた支援システムが不可欠となる。図 1-2 では、ペトリネットとその実践ソフトウェアであるシミュレータの活用を提起するものである。

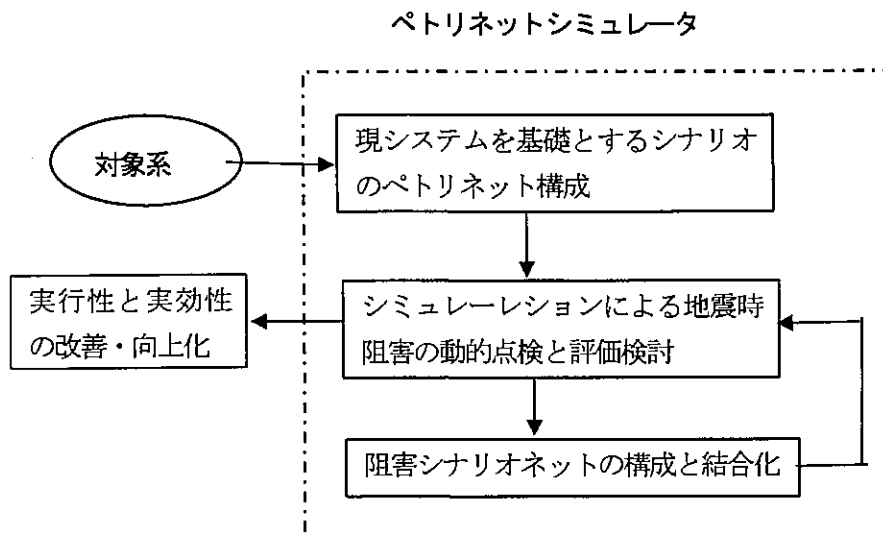


図 1-2 ペトリネットシミュレータによる展開法

1. 2 本研究の構成

本研究では、図 1-1 で述べたように、地震防災計画の「災害応急対応計画」を取り上げて、その中でもく消防防災計画>とく避難計画>を対象系とし、図 1-2 の方法論により研究する。図 1-3 に、その構成を示す。

まず、第 2 章では、本研究の基礎を成すペトリネットの基本形と、その実践ソフトウェアであるシミュレータについて概説する。特に、本研究で重要となる防災計画シナリオでの事象連鎖とその阻害のペトリネットによる記述法、およびその特徴としてのネット間の結合性と動的化の原理の共通性について説明する。さらに、防災計画シナリオの点検・構築の実践形式の基本フレームの提示も行う。

第 3 章と第 4 章では、第 2 章でペトリネットによる記述法を基礎に、消防防災計画を取り上げる。第 3 章では、消防防災計画の一部をなす緊急車両走行のマイクロペトリネット構築を行い、一般車交通による走行性阻害の点検シミュレーションを実行し、単路部と交差点部における緊急車両の走行速度の評価を行うとともに、交差点部の走行支援システムネットを考案し、その評価シミュレーションも実行する。

第 4 章では、図 1-2 の方法論をフレームとして、消防防災システムの地震時点検と再構築の実践を行う。ここでのテーマは、消防防災システムの点検であり、広域での取り扱いが求められる。そのために、第 3 章の

マイクロペトリネットをサブシステムとするマクロペトリネットの構築を行う。また、地震時阻害を切断型と制約型に分けて、それぞれのペトリネット記述を提案し、地震時阻害の点検と再構築を行う。特に、ここでは、司令部における地震時阻害の発生状況に関する情報収集活動の付加と、その結果の緊急車両出動指令への反映化についても検討する。

第5章と第6章では、避難計画シナリオのペトリネット化を取り扱う。第5章では、市街地における避難計画シナリオを、第6章では、中山間地における避難計画シナリオを取り上げる。前者では、地震時木造市街地における多発火災が問題となり、後者では、傾斜地での移動性が問題となる。そのために、前者では、火災延焼のシミュレーションシステムとの、後者では、GPS による高度データ収集システムとの連携化の下で、ペトリネットの活用を実践する。

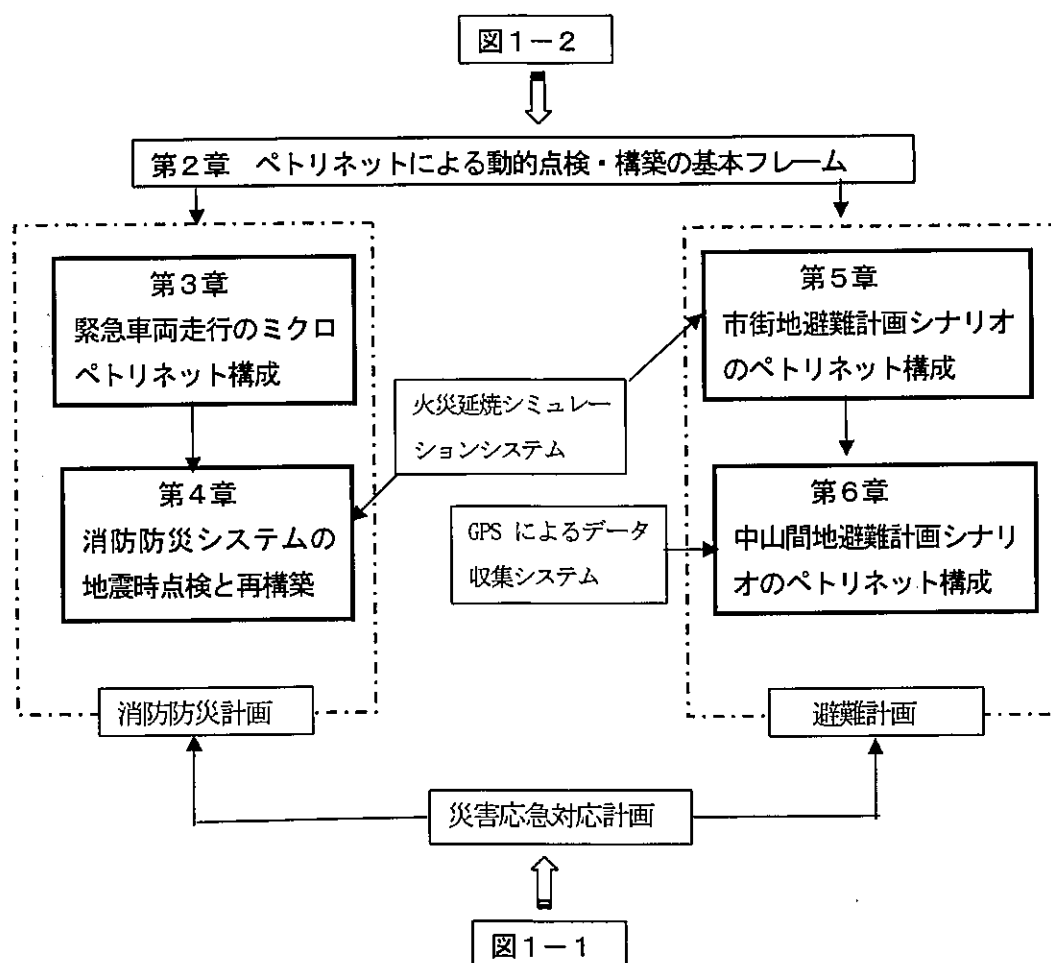


図 1-3 本研究の構成図

第2章 ペトリネットシミュレータによる動的点検・構築支援の基本フレーム

2. 1 まえがき

ペトリネットとは、2種類のノードを有する1種の有向グラフ形式による対象系のシステム記述であり、Carl Adam Petri (1963) によって始められた研究分野である。初期研究では、グラフ形式の持つノードへの可達性の解析性を武器とするシステム手法の新顔とし注目され、種々の拡張化がなされてきたが、研究者にとっては偶然の出会いとさえ言われるレベルにあった。しかし、近年その研究領域は拡大し、hardware の設計にも使用されるようになってきている。

実在系のモデル化との係わりでいえば、2種類のノードに対して、Condition—Event Net という位置づけで理解が出发点となると言える。即ち、実在系は、ある状態(Condition)の下で事象(Event)が生起し、その結果としてまた系は状態を変化させていくプロセスの記述法としてのペトリネットである。このプロセス構造の静的記述が Condition—Event Net であり、静的記述がそのまま動的記述ともなるのがその特徴である。即ち、トークンの Condition ノードへの配置と、Event ノードによるその駆動化により、系の状態推移の動的表現が可能とするシステム手法である。

この方式は、実在系との係わりでは分かりやすいし、実践的で、ペトリネットの魅力を示すものではあるが、状態とか事象とかと呼ぶのには疑問があるというケースもある。そこで、その手法としての抽象度を上げて、Place—Transition Net という位置づけが登場する。ペトリネットとしての形状は全く変わらないのであるが、抽象度の変更の結果、換言すればペトリネットの手法としての認識の変革が、ペトリネット研究の拡大を一気に進め、Colored Time Petri Net の時代となってきている。

木俣は、この抽象化を受ける形で、“Place”を字義通りに“場所”と再解釈することにより、空間対応の動的図解化手法としてのペトリネットの魅力性を主張し、それを引き出すシミュレータ開発を行ってきている。バス交通の優先策とは、まさに「限定された道路時空間を、バスと一般車とがどのように占有化するのが望ましいのか、その制御策の具体化は」という空間対応の動的図解課題であり、その意味でペトリネット活用が有効となる分野であるが、もう一つの有効分野が、本報告書で取り扱う防災計画である。

本章では、防災計画への適用化に必要となるペトリネットの基本原則から始めて、上で触れたペトリネットシミュレータの基本機能と使用法について概説する。まず、2.2 では、防災計画のシナリオ性に着目し、「シナリオとは事象連鎖の指示書である」として、ペトリネットによる事象連鎖記述の基本原則と特徴を述べる。2.3 では、コンピュータ上での実行性との関連で、著者等の開発シミュレータの基本機能を概説し、本支援システムによるシナリオ構成とその批判的・建設的検討の動的支援の基本フレームを提示する。

2. 2 ペトリネットによる防災計画シナリオの基本表現法

(1) ペトリネットの基本形式と基本原則

ペトリネットとは、図 2・2・1 に示すように、トランジション(|), プレース(○), アーク(→, …) によって構成される一種のグラフ形式の対象系の視覚的な表現手法である。このネット例は、t1 というトランジションで表現された事象の生起構造を記述したもので、まず、この事象の生起には、p1, p2, p3 というプレースで表現された状態ないしは条件が関係し、それらの間の関係はアークで表現される。トランジション t1 と“→”で関係づけられた p1 と p2 は、この事象生起の必要条件を意味し、トランジション t1 の入力プレースと呼ばれる。一方、“…”で関係づけられた p3 は抑止プレースと呼ばれ、事象生起の阻害条件を

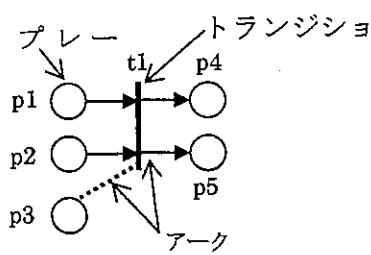


図 2-2-1 ペトリネットの基本

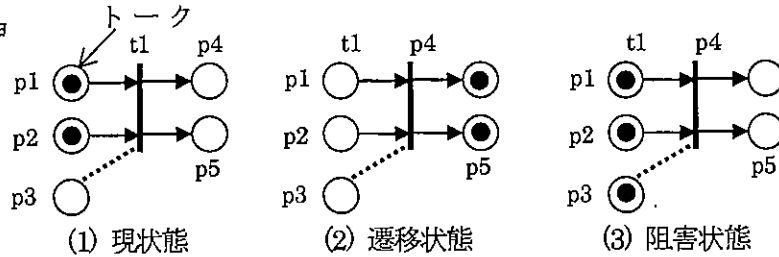


図 2-2-2 ペトリネットの駆動原

意味する。次に、プレースの $p4$ と $p5$ は、この事象の生起後に出現する状態を意味し、トランジション $t1$ の出力プレースと呼ばれ、この関係も図に示すように“→”のアークで表現される。

ペトリネットの特徴の1つは、この静的な記述表現がそのまま動的記述表現に直結する点にある。図 2-2-2 の(1)に示すように、まず、現時点での系の状態は、プレースへのトークン (●) のマーキングによって表現される。動的記述は、このトークンのマーキング状態の事象生起による遷移として表現される。この遷移を規定する規則が以下に示すトランジションの発火則：

- R1) 全ての入力プレースにトークンがマーキングされていて、かつ、
 - R2) 全ての抑止プレースにトークンが存在しないとき、
- 当該トランジションは発火し、
- R3) 全ての入力プレースからトークンを一個ずつ消去し、
 - R4) 全ての出力プレースにトークンを一個ずつ配置する
- である。

図 2-2-2 の(1)では、トランジション $t1$ は、上記ルール R1)と R2)を満たしており、発火し、ルール R3)と R4)の適用によって、図 2-2-2 の(2)に推移することになる。しかし、図 2-2-2 の(3)の状態にあれば、上記ルール R1)は満たすが R2)を満たさず、従ってこの状態になれば、抑止が解除されるまで事象の生起は起きない。

これらの推移は、極めて単純・明快な発火則によるもので、誰にでも手動で容易に確認できる。しかも、トランジションが意味する具体的な事象内容に関係なく、全てに等しく適用されるものである。換言すれば、ペトリネット形式に準拠した記述化が出来れば、その動的視覚的シミュレーションが、直ちに実行可能となる汎用性と即時シミュレーション実行性を備えているといえよう。

ペトリネットによる記述力は、特殊トランジションの導入と発火則の拡大化によって増大する。図 2-2-3 に示すネット図は、生成トランジション $t1$ と選択トランジション $t2$ という2つの特殊なトランジションを含むもので、確率事象ないしは事象連鎖の分岐記述に使用される。即ち、生成トランジション $t1$ の生起によって、その出力プレース $p2$ にマーキングされるトークンにはカラー属性がランダムに付与される。選択ト

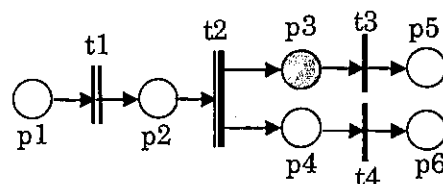


図 2-2-3 生成選択トランジションの機能

ランジション t_2 は、その入力プレース p_2 上のトークンに付与されたカラー属性に従って出力プレースの p_3 または p_4 のいずれかにトークンを選択的にマーキングする働きをする。前出の発火則との関連でいえば、R4)にこの点を付加し、拡張化がなされることになる。

この生成ランジション t_1 と選択ランジション t_2 の組み合わせによって、 p_3 または p_4 状態が確率的に生起する系や、あるいは、事象連鎖が $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3$ と $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_4$ に分岐する状況の記述も可能となる。この生成ランジションでの生成カラー属性数と、その生成確率は任意に指定できる。もちろん、選択ランジションの出力プレース数は指定した属性数に応じて設定する必要がある。また、トークンには、このカラー属性の他に時間属性(タイマ)を付与することもできる。これらの使用によって、ペトリネットは、理解の容易さと同時に多様な表現性にも応えられるものとなっている。

さて、2.1 では、シナリオとは事象連鎖の指示書であると述べた。そこで、図 2-2-2 の(3)のような阻害状況の解消を含む事象連鎖の形成シナリオと、その動的記述法について次に説明することにする。

図 2-2-4 の(1)は、連鎖の形成を構想する 3 つの事象の個々のネットと、図 2-2-2 の(3)の阻害状況の元事象ネットを示したものである。これらは全て共通の構造を持つもので、相互に結合化が可能である。また、そこで適用されるランジションの発火則もまた共通のものである。ペトリネットのこの特徴を活用し、状態ないしは条件の対応性を確認して結合化することで、図 2-2-4 の(2)に示すような事象連鎖系のペトリネット構成が可能となる。このペトリネットは、図 2-2-3 で述べた確率化ネットを含むもので、確率的阻害状況下での目的達成型の事象連鎖シナリオに対応している。

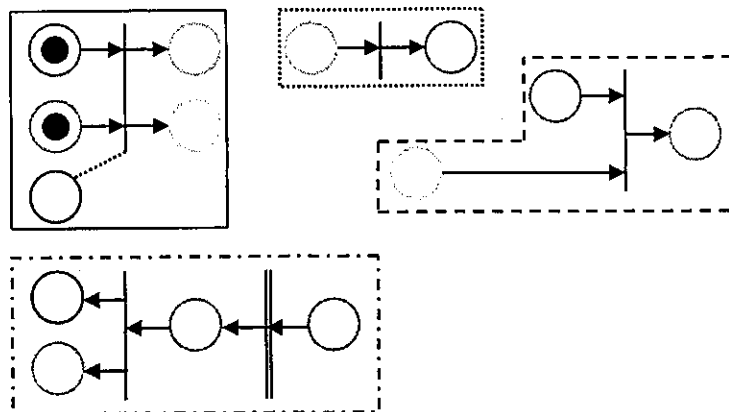


図 2-2-4 (1) 事象連鎖の要素ネット

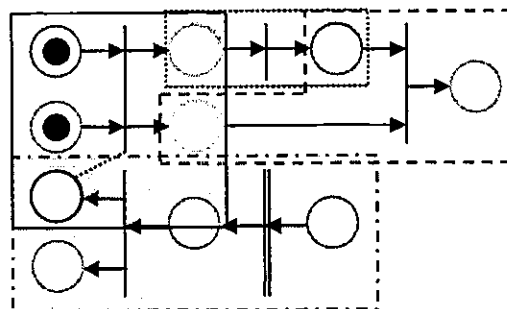


図 2-2-4 (2) 事象連鎖のシステムネット

(2) 事象連鎖系の点検と阻害対応の動的構成支援法

図2-2-4の(2)に示した事象連鎖シナリオの確率的阻害状況下での目的達成性の点検は、図2-2-5の(1)に示す初期設定から始まる状態推移の実行によって行える。P6から進行してくる阻害状況の結果、P8へのトークンのマーキングが無ければ、阻害の発生は無く、T0の阻害の発生は起きず、T0 T1 T3とシナリオ通りの事象連鎖が進行し、目的達成状態のP5にトークンがマーキングされ、目的達成となる。阻害状態が生起する場合には、T0とT4とでの発火則の成立タイミングが問題となる。T4の方が遅ければ問題は無いが、早ければ図2-2-5の(2)の状態となり、目的達成状態のP5にトークンは到達出来なくなる。

図2-2-6の(1)は、この状況に対する対応策の組み入れネットの構成例である。これは、阻害事象の発生源に対して、事前抑止策T5を準備することによって、T3の発火（生起）を阻止し、目的達成事象の連鎖を確保する策といえよう。ここでもタイミングが問題となる。即ち、事前対策が完了する前に災害が発生すれば無効となる。図2-2-6の(2)は、そのための事後対策の組み入れネットの構成例である。即ち、P12とT6の準備により、P8にトークンがマーキングされても、P12にトークンを予め配置して置けば、T6の発火条件が成立し、P8上のトークンを消滅させ、T0への抑止状態を解除し、シナリオ通りの事象連鎖の進行を実現させようとするものである。

第1章で述べたように、防災計画には、点検による事前阻害対策を推進する災害予防計画と、発災時における減災を目的とする災害応急対策計画が必要となるが、上の議論と構築支援は、この両面のシナリオにも対応できることを示すものであるといえるだろう。

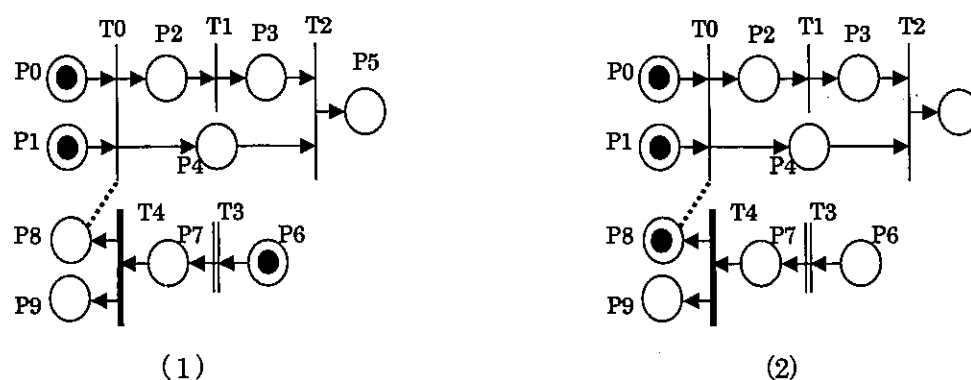


図2-2-5 確率的阻害下での点検

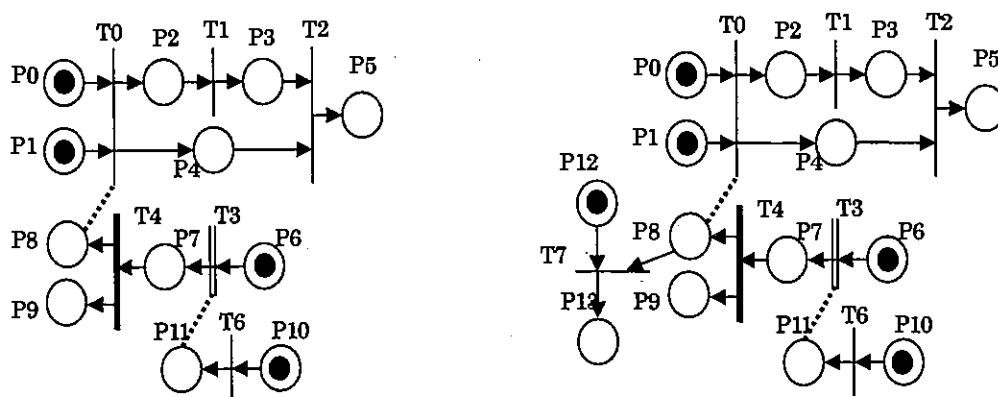


図2-2-6(1) 事前阻害対策の組み入れ

図2-2-6(2) 事後阻害対策の組み入れ

以上のように、ペトリネットの特徴であるネット共通構造的な活用により、防災計画のシナリオの展開的な構成が比較的容易に行うことが出来る。また、図 2-2-5 のネットでも、図 2-2-6 の(1)、(2)のネットでも、どのように事象連鎖と阻害が生じるのかは、トランジションの発火則、R1) ~ R4)を適用することで、誰にでも容易に確認することができるだろう。この確認検討の容易性も、防災計画シナリオの批判的・建設的検討支援に不可欠となる重要なシステム要件である。

(3) ペトリネットのシステムデータ表現

実践レベルでの対象系記述では、ネットは大きくなり、挙動も複雑となる。そのために、コンピュータシステムが不可欠となる。著者らは、現時点で一般に広く利用可能な Windows 環境での実行ソフトウェアとしてペトリネットシミュレータを開発してきている。このシステムについては、2.3 で紹介する。ここでは、その使用の前提として、対象系記述のペトリネットを、Sdata ファイル形式によってシステムデータ表現化する方式について概説する。

図 2-2-7 は、避難計画シナリオの基本部分ネットである空間移動のペトリネットである。Sdata ファイルとは、表 2-2-1 に示すようなもので、対象ネットの全ての構成要素について、一定の形式でそれらの特定化を、整数値を用い、1 行単位で記述したものである。詳細は参考文献に譲るが、図 2-2-7 のネットと対応させて、その基本事項を以下で述べる。

Sdata ファイルは、表 2-2-1 に示すように、PLACE・TRAN・TOKEN・GENE・gereatranZ の記述部位からなり、各々は、これらの表記の後に総数を記した行から始まる。図 2-2-7 からこのネットには、p0 ~ p13 のプレース群がふくまれており、その総数は 14 であり、表 2-2-1 は PLACE 14 という記載行から始まることになる。TOKEN を除く TRAN・GENE・gereatranZ の部位の記載も、図 2-2-7 のネットとの関連で了解されるだろう。なお、プレースもトランジションもともに 0 から始まる連続番号が割り振られる。

次に、表 2-2-1 に示す代表例を用いて、各部位での要素の特定化の書式を説明する。具体的には、各行の最後に * 付きで記載されているコメント文を参照し、図 2-2-7 のネットと関連付けて説明する。プレースの

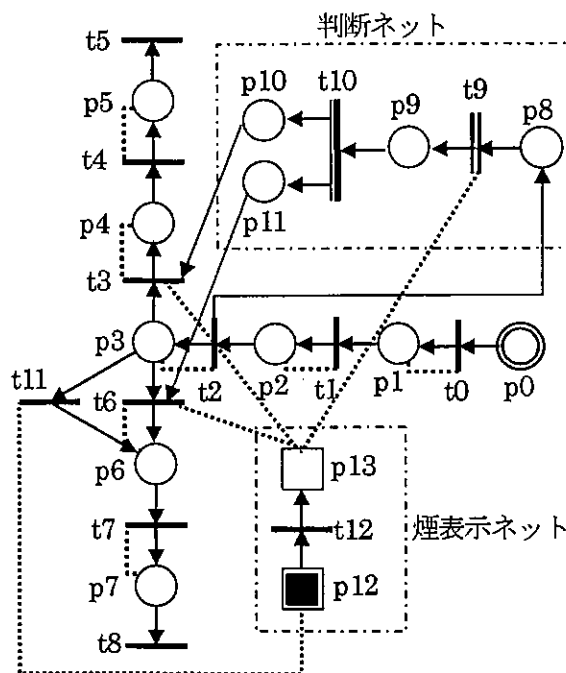


図 2-2-7 T 字路を含む避難部分システム

表 2-2-1 Sdata ファイル

PLACE 14					
0	-1	10124	0	1	/*0移動部分
1	-1	10124	0	1	/*1
2	-1	10124	0	1	/*2 (T字部手前)
3	-1	10124	0	1	/*3
4	-1	10124	0	1	/*4
5	-1	10124	0	1	/*5
6	-1	10124	0	1	/*6
7	-1	10124	0	1	/*7
8	-1	0	0	0	/*8 判断ネット
9	-1	0	0	0	/*9
10	-1	1	0	0	/*10 (右方向)
11	-1	2	0	0	/*11 (左方向)
12	-1	10	0	2	99 /*12煙なし
13	-1	0	2	99	/*13煙あり(右方向から)
end					
TRAN 13					
0	-1	1	-1	0	0 /*0移動部分
1	-1	2	-1	0	0 /*1
2	-1	3	-1	0	0 /*2 (判断手前)
3	10	-1	4	-1	0 0 /*3
4	-1	5	-1	0	0 /*4
5	-1	6	-1	0	0 /*5
6	11	-1	6	-1	0 0 /*6
7	-1	7	-1	0	0 /*7
8	-1	8	-1	0	0 /*8
9	-1	9	-1	1	0 /*9 生成T
10	-1	10	-1	2	0 /*10選択T
11	-1	6	-1	0	0 /*11煙回避用T
12	-1	13	-1	0	0 /*12煙なしあり切替
end					
TOKEN 100					
12	60				
2					
GENE 1					
10	5				
1					
generatranZ 1					
9	1	60	2	40	

特定化書式は、| 抑止トランジションリスト | - 1 | プレースタイマ | カラー | 表示・非表示 | からなる。第1例は、コメント文よりT字路の手前にあるプレース p2 の特定化で、図 2-2-7 のネットより、このプレースが抑止しているトランジションは t1 のみであるので、まず、その番号 1 が記載される。プレースタイマが 10124 となっているのは、前述した整数値のみ使用という制約から、小数点を持つタイマ使用時の表記形式によるもので、実際には、1.24 秒という設定で処理される。カラーの項の 0 は、継承を意味し、最後の 1 は、表示を意味する。ちなみに、非表示は 0 である。この機能の活用については、出力画面との関連で後述する。第2例は、判断ネットでの右方向カラーの出力プレース p10 の特定化で、抑止トランジションはなく、タイマも無く (-1 で表記)、カラーは 1 (右方向カラー番号) で、0 の非表示の設定となっている。最後の例は、煙なしの表示の□型プレース p12 の記載で、最後の表示・非表示項の表記形式が特殊な形となり、299 となる。また、この□型プレースは、常に表示扱いとなる。これも後で再述する。

トランジションの特定化書式は、| 入力プレースリスト | - 1 | 出力プレースリスト | - 1 | トランジション種類 | 表示・非表示 | からなる。最初の例は、t2 の記載で、その入力プレースは p2 の1個で、出力プレースは p3 と p8 の2個で、トランジション種類は一般 (0) である。一方、第2例は、生成トランジション t9 の記載で、トランジション種類は 1 となる。ちなみに、選択トランジションの場合は 2 で表記される。

TOKEN の部分には、初期条件としてトークンを配置するプレース番号とそのタイマとが記載される。TOKEN 100 とあるのは、他の書式とは異なり、使用される最大トークン数を意味する。この Sdata ファイルで 12 60 とされているのは、図 2-2-7 のネットの p12、即ち、“煙無し”の状態を初期条件とし、そこに設定されたタイマの 60 秒後に“煙有り”と想定したことになる。

GENE は、本論文では触れなかったが、トークンを指定された平均値を持つポアソン分布に従ってランダムに生成する特殊プレースの特定化の部位で、| プレース番号 | タイマ | からなる。図 2-2-7 のネットでは、p0 に 1 分間に平均 5 人の割合でランダムに到着した人が経路を歩行移動するとしており、0 5 という記載となっている。

gereatranZ は、カラー属性付きのトークンを生成する生成トランジションの特定化の部位である。図 2-2-7 のネットでは、t9 のみが該当する。この書式は、| トランジション番号 | カラー番号と生成比率リスト | で、ここでは、9 1 60 2 40 としている。カラー番号 1 は T 字路での右方向選択カラーであり、2 が左方向選択カラーとなっており、前述した実験的研究の結果の反映化は、この部分への記載で可能となるといえよう。

2. 3 ペトリネットの動的点検構築支援の実践形式

(1) ペトリネットシミュレータの実行環境と構築手順

上では、ペトリネット表現の基本特徴を述べ、事象連鎖としてのシナリオ記述への適用性を示すとともに、確率的阻害状況下での点検と、事前対策および事後対策計画の組み入れネットの発展的構築について述べてきた。また、そこで示したネットは、いずれもトランジションの発火則を適用することで、手動でその動的挙動を視覚的に確認できることを示した。そして、この理解の容易さは、防災計画シナリオでの諸想定を批判的・建設的に検討する支援システムとして重要な要件であるとした。

一方、現実的規模の防災計画シナリオのペトリネット構築や、その批判的・建設的検討支援では、より大規模化し、複雑化するシステムネットの取り扱いのため、コンピュータシステムが不可欠となるとし、その前提として、システムネットの Sdata 表現化の概説を行ってきた。この項では、著者等が開発してきたペトリネットシミュレータに装備している諸メニューとの関連で、その実行手順について概説する。

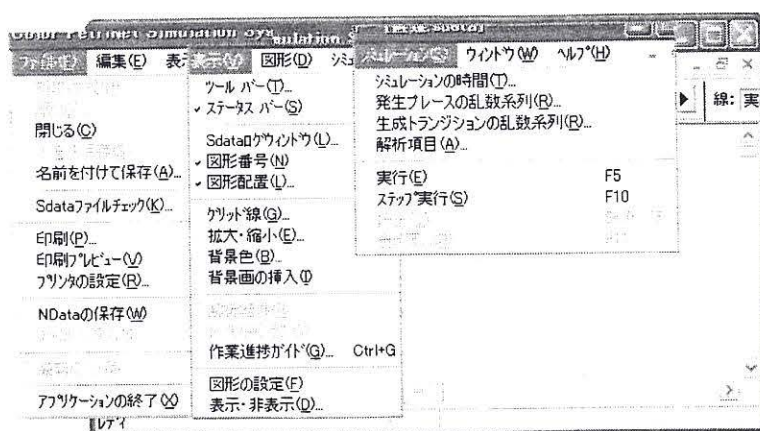


図 2-3-1 ペトリネットシミュレータの基本メニュー画面

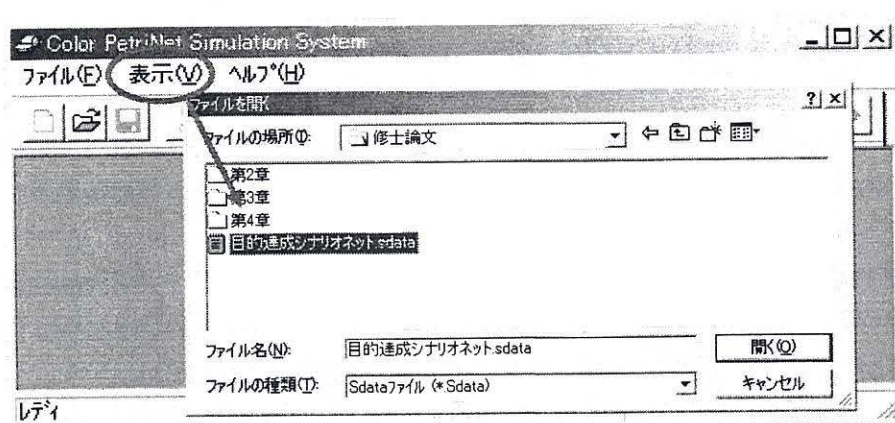


図 2-3-2(1) Sdata ファイルの指定

図 2-3-1 に本シミュレーションの基本メニュー画面を示す。コンピュータシミュレーションへの移行手順は、対象とするネットモデルを、このメニューに見られる「Sdata ファイル」で記述することから始まる。Sdata ファイルの作成は、2.2 の(3)で概説したように、システムネット図が出来ていれば、初期条件やパラメータ設定を除き、この書式による記載に必要な基本情報は全てがネット図内に揃っており、比較的容易な作業といえよう。

Sdata ファイルの作成ができれば、図 2-3-2(1)に示すように、まず、それを実行ソフトウェアで開き、図 2-3-1 の諸メニューを活用し、視覚型シミュレーションシステムを構築して行くことになる。

図 2-3-2(2)は、開いた Sdata ファイルに関して、そのネット図作成が未実行ないしは未完成なときに出されるメッセージである。「はい」をクリックすることで、メニューの「図形配置」の支援画面となる。配置すべきネットの要素、プレースとトランジションのリストが支援画面に表示され、そこから選択し、コンピュータ画面に次々と配置していけばよい。プレースとトランジションをつなぐアークは、Sdata ファイルが参照され、自動的に描画されるようにしてある。

コンピュータ画面に構築されたネット図は、その座表データが自動的に収得されて、図 2-3-2(1)に示すような形式の Ndata ファイルとして保存される。従って、以後は、このファイルとセットで Sdata ファイルが開かれ、視覚的な出力画面として使用できることになる。

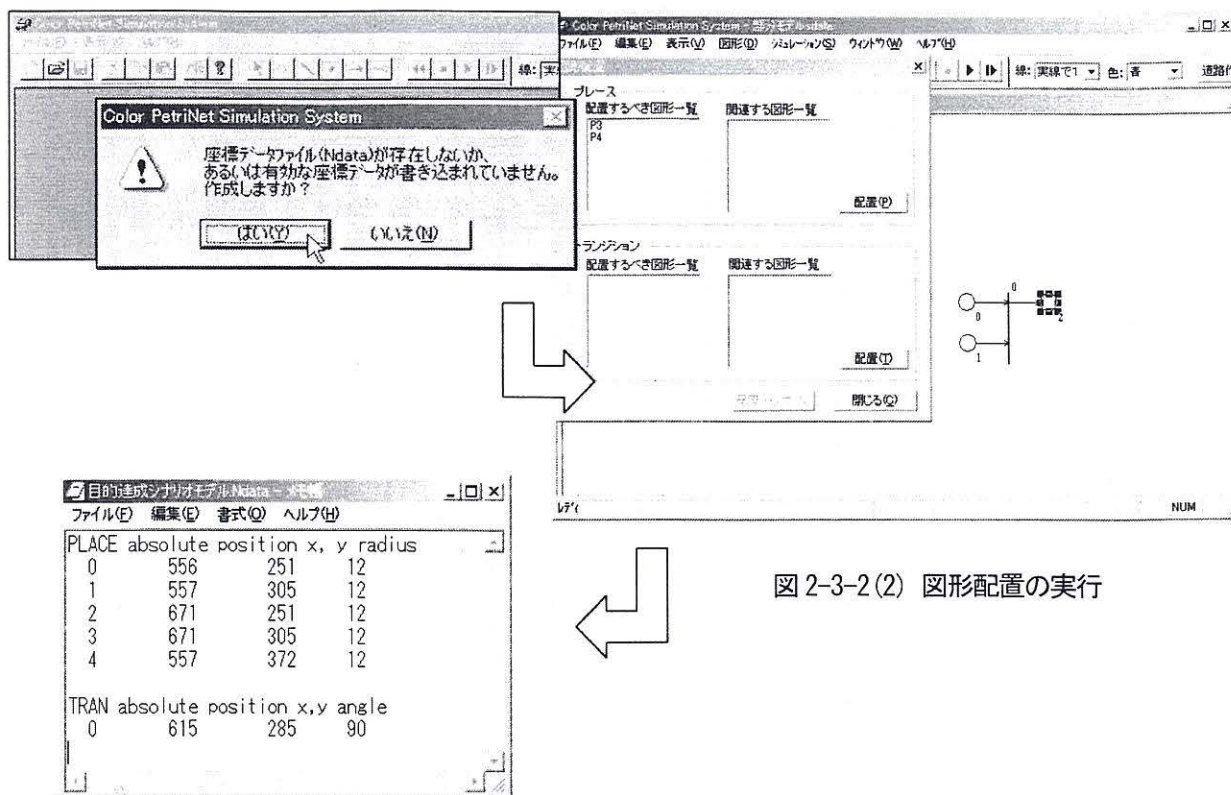


図 2-3-2(3) Ndata ファイルの生成

(2) システムネットの動的点検構築支援の実行

この項では、2.2 の(2)で展開した防災計画のシナリオネットと、その動的構築手順を具体例として、(1)で紹介したペトリネットシミュレータ環境下で、それらの具体的な支援実行について述べる。

まず、図 2-3-3 の(1)に、2.2 の図 2-2-4 ないしは図 2-2-5 のシナリオネットの Sdata ファイルを示す。このファイルを開き、(1)で述べた手順によって、コンピュータ画面上に構築したネット図が、図 2-3-3 の(1)である。このペトリネットの駆動により、われわれは確率的障害下での目的達成の事象連鎖の遂行シナリオの点検を行い、障害リスクの認識に達する。そして、事前障害対策の追加へと計画シナリオの改定を発議した。図 2-3-4 の(1)は、この追加のために初期 Sdata ファイルの拡張化を行ったものである。図 2-3-3 の(1)と比較することで何処が変更されたかは容易に分かるだろう。プレースを 2 個、トランジションを 1 個、それぞれに追加し、追加したプレースの 1 個にトークンの初期配置を行っている。また、追加したプレースの 1 個からトランジション 3 に抑止を設けている。これらのことは、2.3 の(3)の Sdata ファイルの記述形式を参照してもらえれば理解してもらえるだろう。

この拡張 Sdata ファイルを開くと、図 2-3-2 の(2)と同じメッセージがでるので、未完成部分の追加配置のみを行えばよい。図 2-3-4 の(2)は、この作業によって構築されたものである。この事前障害対策の追加計画シナリオネットも、プログラムの修正なしで、直ちにシミュレーション実行が可能であり、その点検・検討支援に移れることになる。

図 2-3-5 は、これらの作業がさらに展開され、事前の予防対策と事後の応急対策とを想定した防災計画シナリオの点検シミュレーションネットとなることを示している。

以上のように、ペトリネットシミュレータの支援環境下では、われわれは、防災計画をシナリオとして眺め、その種々の状況下での課題を、批判的・建設的な視点より点検・検討し、構築・発議するという形で作業を行うことができるようになるだろう。

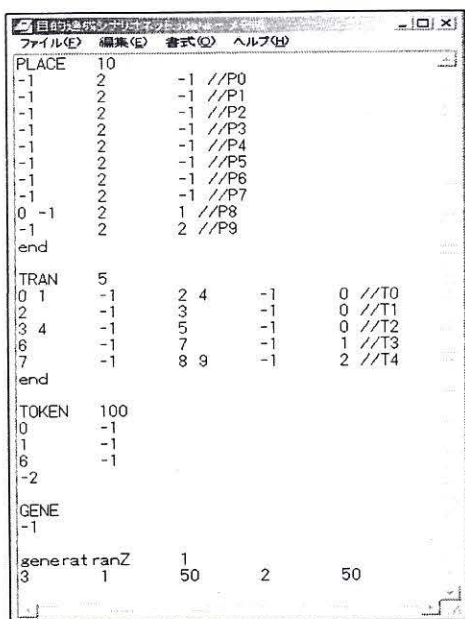


図 2-3-3(1) Sdata ファイルの作成

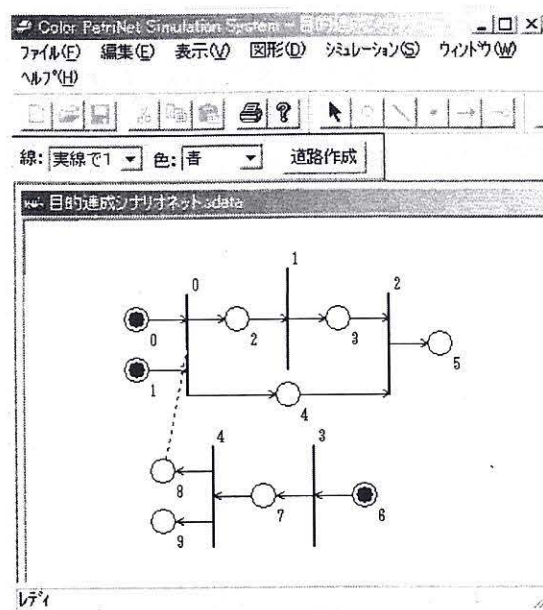


図 2-3-3(2) ネット図の構築

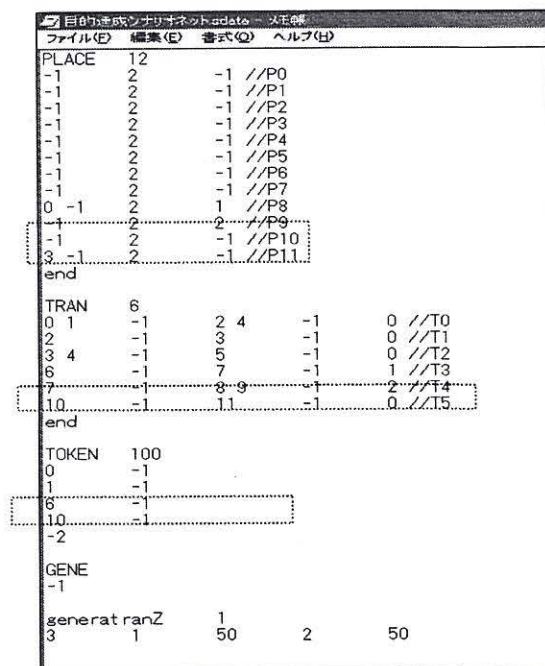


図 2-3-4(1) 拡張 Sdata ファイルの作成

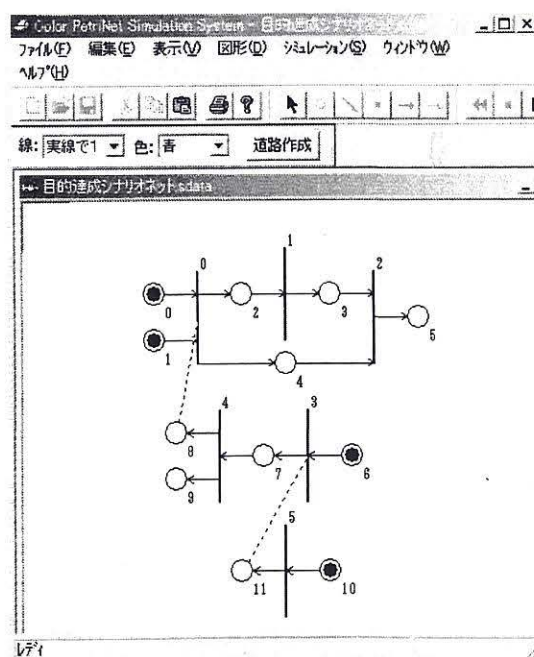
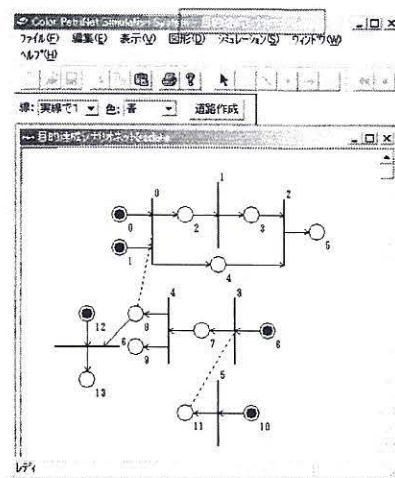


図 2-3-4(2) 事前対策ネットの追加構築



PLACE	12				
1	2	-1	//P0		
2	2	-1	//P1		
3	2	-1	//P2		
4	2	-1	//P3		
5	2	-1	//P4		
6	2	-1	//P5		
7	2	-1	//P6		
8	2	-1	//P7		
9	2	-1	//P8		
10	2	-1	//P9		
11	2	-1	//P10		
12	2	-1	//P11		
end					
TRAN	8				
0	1	-1	2	4	-1
1	2	-1	3	5	-1
2	3	-1	4	6	-1
3	4	-1	5	7	-1
4	5	-1	6	8	-1
5	6	-1	7	9	-1
6	7	-1	8	10	-1
7	8	-1	9	11	-1
8	9	-1	10	12	-1
9	10	-1	11	13	-1
10	11	-1	12	14	-1
11	12	-1	13	15	-1
12	13	-1	14	16	-1
13	14	-1	15	17	-1
14	15	-1	16	18	-1
15	16	-1	17	19	-1
16	17	-1	18	20	-1
17	18	-1	19	21	-1
18	19	-1	20	22	-1
19	20	-1	21	23	-1
20	21	-1	22	24	-1
21	22	-1	23	25	-1
22	23	-1	24	26	-1
23	24	-1	25	27	-1
24	25	-1	26	28	-1
25	26	-1	27	29	-1
26	27	-1	28	30	-1
27	28	-1	29	31	-1
28	29	-1	30	32	-1
29	30	-1	31	33	-1
30	31	-1	32	34	-1
31	32	-1	33	35	-1
32	33	-1	34	36	-1
33	34	-1	35	37	-1
34	35	-1	36	38	-1
35	36	-1	37	39	-1
36	37	-1	38	40	-1
37	38	-1	39	41	-1
38	39	-1	40	42	-1
39	40	-1	41	43	-1
40	41	-1	42	44	-1
41	42	-1	43	45	-1
42	43	-1	44	46	-1
43	44	-1	45	47	-1
44	45	-1	46	48	-1
45	46	-1	47	49	-1
46	47	-1	48	50	-1
47	48	-1	49	51	-1
48	49	-1	50	52	-1
49	50	-1	51	53	-1
50	51	-1	52	54	-1
51	52	-1	53	55	-1
52	53	-1	54	56	-1
53	54	-1	55	57	-1
54	55	-1	56	58	-1
55	56	-1	57	59	-1
56	57	-1	58	60	-1
57	58	-1	59	61	-1
58	59	-1	60	62	-1
59	60	-1	61	63	-1
60	61	-1	62	64	-1
61	62	-1	63	65	-1
62	63	-1	64	66	-1
63	64	-1	65	67	-1
64	65	-1	66	68	-1
65	66	-1	67	69	-1
66	67	-1	68	70	-1
67	68	-1	69	71	-1
68	69	-1	70	72	-1
69	70	-1	71	73	-1
70	71	-1	72	74	-1
71	72	-1	73	75	-1
72	73	-1	74	76	-1
73	74	-1	75	77	-1
74	75	-1	76	78	-1
75	76	-1	77	79	-1
76	77	-1	78	80	-1
77	78	-1	79	81	-1
78	79	-1	80	82	-1
79	80	-1	81	83	-1
80	81	-1	82	84	-1
81	82	-1	83	85	-1
82	83	-1	84	86	-1
83	84	-1	85	87	-1
84	85	-1	86	88	-1
85	86	-1	87	89	-1
86	87	-1	88	90	-1
87	88	-1	89	91	-1
88	89	-1	90	92	-1
89	90	-1	91	93	-1
90	91	-1	92	94	-1
91	92	-1	93	95	-1
92	93	-1	94	96	-1
93	94	-1	95	97	-1
94	95	-1	96	98	-1
95	96	-1	97	99	-1
96	97	-1	98	100	-1
97	98	-1	99	101	-1
98	99	-1	100	102	-1
99	100	-1	101	103	-1
100	101	-1	102	104	-1
101	102	-1	103	105	-1
102	103	-1	104	106	-1
103	104	-1	105	107	-1
104	105	-1	106	108	-1
105	106	-1	107	109	-1
106	107	-1	108	110	-1
107	108	-1	109	111	-1
108	109	-1	110	112	-1
109	110	-1	111	113	-1
110	111	-1	112	114	-1
111	112	-1	113	115	-1
112	113	-1	114	116	-1
113	114	-1	115	117	-1
114	115	-1	116	118	-1
115	116	-1	117	119	-1
116	117	-1	118	120	-1
117	118	-1	119	121	-1
118	119	-1	120	122	-1
119	120	-1	121	123	-1
120	121	-1	122	124	-1
121	122	-1	123	125	-1
122	123	-1	124	126	-1
123	124	-1	125	127	-1
124	125	-1	126	128	-1
125	126	-1	127	129	-1
126	127	-1	128	130	-1
127	128	-1	129	131	-1
128	129	-1	130	132	-1
129	130	-1	131	133	-1
130	131	-1	132	134	-1
131	132	-1	133	135	-1
132	133	-1	134	136	-1
133	134	-1	135	137	-1
134	135	-1	136	138	-1
135	136	-1	137	139	-1
136	137	-1	138	140	-1
137	138	-1	139	141	-1
138	139	-1	140	142	-1
139	140	-1	141	143	-1
140	141	-1	142	144	-1
141	142	-1	143	145	-1
142	143	-1	144	146	-1
143	144	-1	145	147	-1
144	145	-1	146	148	-1
145	146	-1	147	149	-1
146	147	-1	148	150	-1
147	148	-1	149	151	-1
148	149	-1	150	152	-1
149	150	-1	151	153	-1
150	151	-1	152	154	-1
151	152	-1	153	155	-1
152	153	-1	154	156	-1
153	154	-1	155	157	-1
154	155	-1	156	158	-1
155	156	-1	157	159	-1
156	157	-1	158	160	-1
157	158	-1	159	161	-1
158	159	-1	160	162	-1
159	160	-1	161	163	-1
160	161	-1	162	164	-1
161	162	-1	163	165	-1
162	163	-1	164	166	-1
163	164	-1	165	167	-1
164	165	-1	166	168	-1
165	166	-1	167	169	-1
166	167	-1	168	170	-1
167	168	-1	169	171	-1
168	169	-1	170	172	-1
169	170	-1	171	173	-1
170	171	-1	172	174	-1
171	172	-1	173	175	-1
172	173	-1	174	176	-1
173	174	-1	175	177	-1
174	175	-1	176	178	-1
175	176	-1	177	179	-1
176	177	-1	178	180	-1
177	178	-1	179	181	-1
178	179	-1	180	182	-1
179	180	-1	181	183	-1
180	181	-1	182	184	-1
181	182	-1	183	185	-1
182	183	-1	184	186	-1
183	184	-1	185	187	-1
184	185	-1	186	188	-1
185	186	-1	187	189	-1
186	187	-1	188	190	-1
187	188	-1	189	191	-1
188	189	-1	190	192	-1
189	190	-1	191	193	-1
190	191	-1	192	194	-1
191	192	-1	193	195	-1
192	193	-1	194	196	-1
193	194	-1	195	197	-1
194	195	-1	196	198	-1
195	196	-1	197	199	-1
196	197	-1	198	200	-1
197	198	-1	199	201	-1
198	199	-1	200	202	-1
199	200	-1	201	203	-1
200	201	-1	202	204	-1
201	202	-1	203	205	-1
202	203	-1	204	206	-1
203	204	-1	205	207	-1
204	205	-1	206	208	-1
205	206	-1	207	209	-1
206	207	-1	208	210	-1
207	208	-1	209	211	-1
208	209	-1	210	212	-1
209	210	-1	211	213	-1
210	211	-1	212	214	-1
211	212	-1	213	215	-1
212	213	-1	214	216	-1
213	214	-1	215	217	-1
214	215	-1	216	218	-1
215	216	-1	217	219	-1
216	217	-1	218	220	-1
217	218	-1	219	221	-1
218	219	-1	220	222	-1
219	220	-1	221	223	-1
220	221	-1	222	224	-1
221	222	-1	223	225	-1
222	223	-1	224	226	-1
223	224	-1	225	227	-1
224	225	-1	226	228	-1
225	226	-1	227	229	-1
226	227	-1	228	230	-1
227	228	-1	229	231	-1
228	229	-1	230	232	-1
229	230	-1	231	233	-1
230	231	-1	232	234	-1
231	232	-1	233	235	-1
232	233	-1	234	236	-1
233	234	-1	235	237	-1
234	235	-1	236	238	-1
235	236	-1	237	239	-1
236	237	-1	238	240	-1
237	238	-1	239	241	-1
238	239	-1	240	242	-1
239	240	-1	241	243	-1
240	241	-1	242	244	-1
241	242	-1	243	245	-1
242	243				

する必要はない。

図 2-3-7(3)は、この構築作業の完成後に<表示・非表示>を活用し、避難者の占める空間を意味するプレースのみを表示とした出力画面である。この画面では、前述したように、□型プレースも表示されてくる。表示位置が、図 2-2-7 のネットとは異っているが、“右方向通路の煙の有無”に対応させるために、構築画面上でネットの要素ないしは部分ネットをドラッグし、移動させることができることを利用し、視覚的にも分かり易くする工夫を行ったことによる。ネットの視覚的な煩雑性を処理するこのような機能によって、人の動きに焦点を当てた出力となり、直観的・経験的検討の容易さという特徴も実支援レベルで保持しているといえるだろう。また、疑問点が指摘されれば、逆の操作で、その細部表示に戻すことも、その部分をドラッグで移動させ、拡大することも可能で、モデル化レベルでの検討や、修正ないしは精緻化案の発想支援にも有効となるだろう。

さらに、構築した視覚出力ネット図については、各要素の座標データが自動生成され、Ndata ファイルとして自動保存される。Sdata ファイル上での数値的変更による繰り返しシミュレーションは、Sdata ファイル名から Ndata ファイルが参照されるために、視覚出力ネット図はそのまま引き継がれることになる。前述した Sdata ファイル作成時の初期条件やパラメータの設定課題も、この形式で検討することで解消されるだろう。

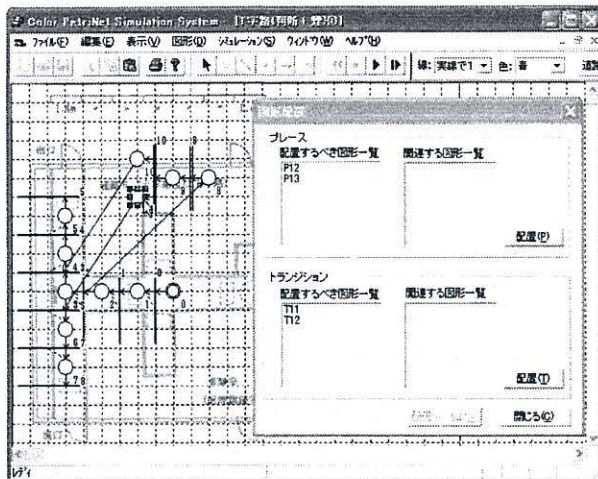


図 2-3-7(2) 背景画像上でのネット構築支援画面

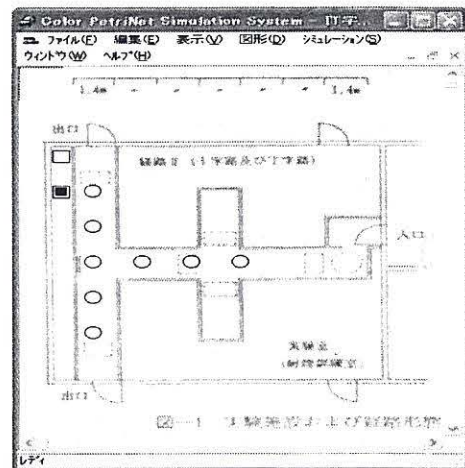


図 2-3-7(3) 空間対応型の T 字路ネット

2. 4 参考文献

- 1) 木俣昇, 高木秀彰, 黒川浩嗣: ペトリネットによる交通流シミュレーションシステムの開発, 土木計画学研究・論文集, No.12, 691-699, 1995.
- 2) 木俣昇, 鷺見育男: 消防防災システムの阻害要因のペトリネットシミュレーションに関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No.14, 393-400, 1997.
- 3) 木俣昇, 中村彰彦: 交通流ペトリネットシミュレータにおける背景画像上でのデータベース化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, 51-62, 2004.
- 4) 木俣昇, 曾根岳志: ペトリネットによる背景画像上での建物避難シナリオのシミュレーション研究, 土木計画学研究 土木計画学研究・論文集, Vol.22, 2005.10, 53-64
- 5) 堀浩三, 木俣昇: ペトリネットシミュレータによる背景画像上での地震時緊急路の点検・構築支援システム, 土木計画学研究・講演集, 32 巻(CD-ROM 版) No.40, 2005.12.
- 6) W.Reisig : A Primer in Petri Net Design, Springer-Verlag, 1991.
- 7) Kurt Jensen : Coloured Petri Nets, Vol.1~Vol.3 1997.

第3章 緊急車両走行のマイクロペトリネットシミュレーション開発

3. 1 まえがき

消防・救急システムは、人命に直接かわるものであり、災害応急対応時はもちろんのこと、通常時においても重要な点検・再構築支援の対象課題である。本章では、第2章で準備したペトリネットによる動的点検・構築支援のフレームにより、消防・救急システムの中核となる緊急車両の走行シミュレーションシステムの構築・開発を行うとともに、市街地走行での課題として、交差点走行時の速度低下を明らかにし、その対策として、緊急車両走行時の信号制御システムの構築とその効果評価のシミュレーション実行を行う。

われわれは、第2章で紹介したように、ペトリネットの動的図解化手法という側面を強調し、新たな活用法を提案するとともに、その実行シミュレーションを開発してきた。その具体的な適用研究の一つとして、交通流のシミュレーション開発を進めてきた。本章で取り扱う緊急車両走行のマイクロペトリネットシミュレーションは、この交通流シミュレーションネットを基礎にして、第2章で述べたペトリネット手法の長所であるネット間の結合性、発火則の普遍性を活用することによって、段階的・拡張的な開発が可能となる。

開発済みの交通流シミュレーションネットには、一般車交通流ネットと一般車・大型車混在流ネットがある。まず、3.2で、この2つのネットの概説を行う。次に、3.3では、大型車を緊急車両に読み替え、その走行特性である「警報」と「一般車規制」のペトリネット表現化を行い、それらの組み入れによる緊急車両走行のマイクロペトリネットの構築・展開を行う。3.4では、まだまだ多数存在する2車線道路での緊急車両走行のシミュレーション実行を行い、交差点内走行での課題を点検する。そして、3.5において、緊急車両からの発信信号を受けて信号制御を行うシステムネットを提示し、交差点内走行支援システムとしての効果評価を行う。

なお、ここで開発するシステムネットをマイクロとしているのは、第4章で取り扱う緊急路の走行性ネットと対比してのことである。即ち、第4章では、消防防災システムの広域での点検・構築支援を課題とするために、マクロネットの構築・開発となる。本章での開発システムは、このマクロネットのパラメータ設定という意味も有するものである。

3. 2 交通流のペトリネットシミュレーション概説

(1) 車両走行の基本ペトリネットモデル

第2章で述べたように、ペトリネットの基本形は、トランジション＝事象、プレース＝状態、アーク＝状態と事象間の関係(入出力と抑止)とする一種のグラフ形式による表現態で、プレース上のトークンにより状態の生起状況を指示するというものである。トークンは、トランジションの発火則：

R-1：すべての入力プレースにトークンがマーキングされていて、かつ、

R-2：すべての抑止プレースにトークンが存在しないとき
に発火し、

R-3：すべての入力プレースからトークンを1個消去し、かつ、

R-4：すべての出力プレースからトークンを1個配置する

によって動的挙動を取る。

R-1でいう“トークンがマーキング”とは、時間ペトリネットの形式において、当該トークンに付与されたタイムが既に消費された状態をいう。交通流のペトリネットは、車速や信号現示等の時間要素を持つもの

で、この時間ペトリネットのケースに当る。

まず、図 3-2-1 に、車両進行の基本ペトリネットとモデル化の概念図を示す。即ち、道路空間を閉塞区間に分割し、車両が存在する当該閉塞空間から前方の閉塞空間へ進行する事象＝トランジションに着目するもので、その生起条件は、当該閉塞空間に車両が存在し、かつ前方の閉塞空間が空きであることから、閉塞区間の状態を 2 個のプレース、P1＝“閉塞空間に車両が存在”と P2＝“閉塞空間が空き”で表現し、条件関係より、図 3-2-1 に示すようなアークを設定することで、すべての地点での車両の安全な進行がトランジションの発火則自体で保証されているモデル化となっている。

図 3-2-2 は、この基本ネットを対象道路の閉塞区間数に応じて結合化させ、さらに、車両の発生部と信号制御部を結合化させて構成した一般車交通流の基本システムネットである。発生部の P0 は特殊なプレースで、トークン＝車両を指定された平均値（台／分）を持つポアソン分布によって生成する。信号部は、青＝P9、黄＝P10、赤＝P11 に対応するプレースと、それらの現示状態に切り替えるトランジションとによって構成される。そして、赤現示のプレース P11 より車両進行のトランジション T3 に抑止アークを設けることで、車両進行の信号制御がなされている。

図 3-2-3 の(1)～(4)は、車両の発生から始まり、トランジションの発火則によって車両進行が繰り返えされ、信号交差点手前にまで走行してくる状況を示している。この時点での信号現示は、トークンが P11 にあるために赤であることが分かる。従って、このネット状態では、発火則の R-1 は成立するが R-2 が成立しないためにトランジションの発火は生起せず、車両は停車することになる。図 3-2-3(5)では、赤現示のタイマが消費され、マーキング状態になると、信号現示の切り替えのトランジションが発火し、このトークンは消去され、P9＝青に出力されたことを示している。この状況で抑止プレースにトークンはなくなり、発火則の R-2 も成立することとなり、図 3-2-3(6)では、車両が前方閉塞区間に進行したことを示している。

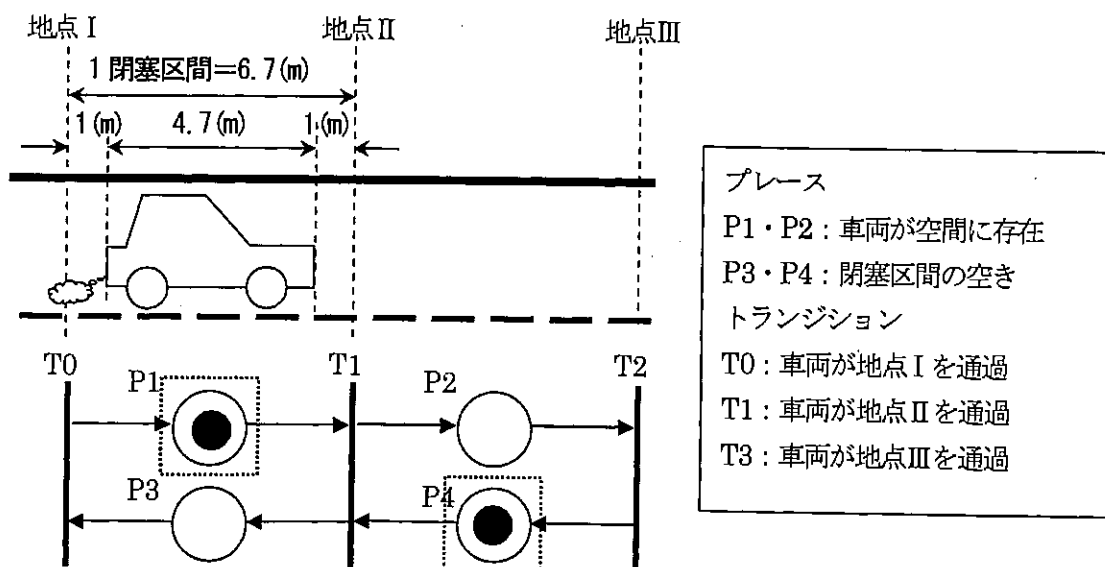


図 3-2-1 一般車ペトリネット基本形の入出力関係

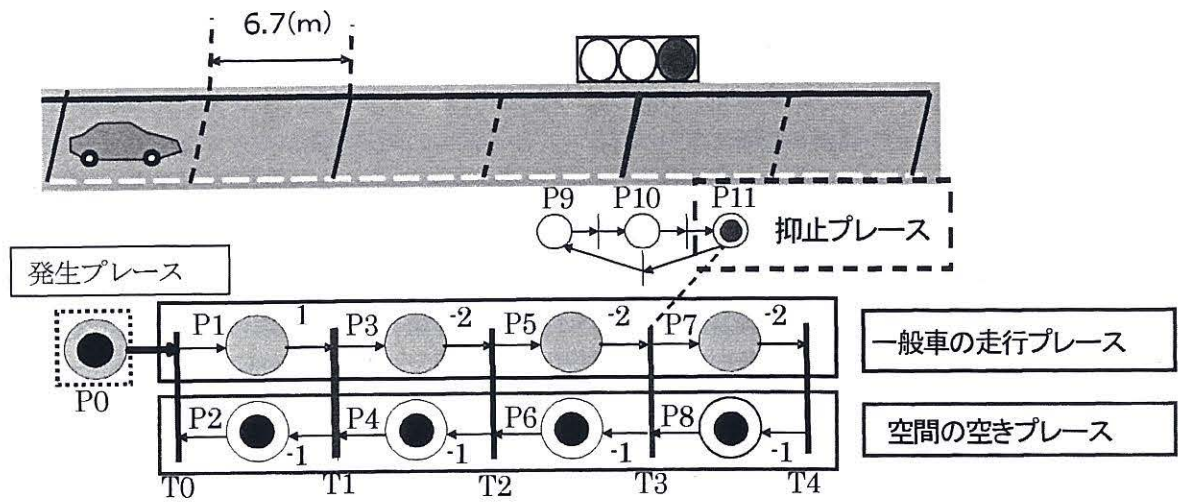


図 3-2-2 一般車交通流ネット

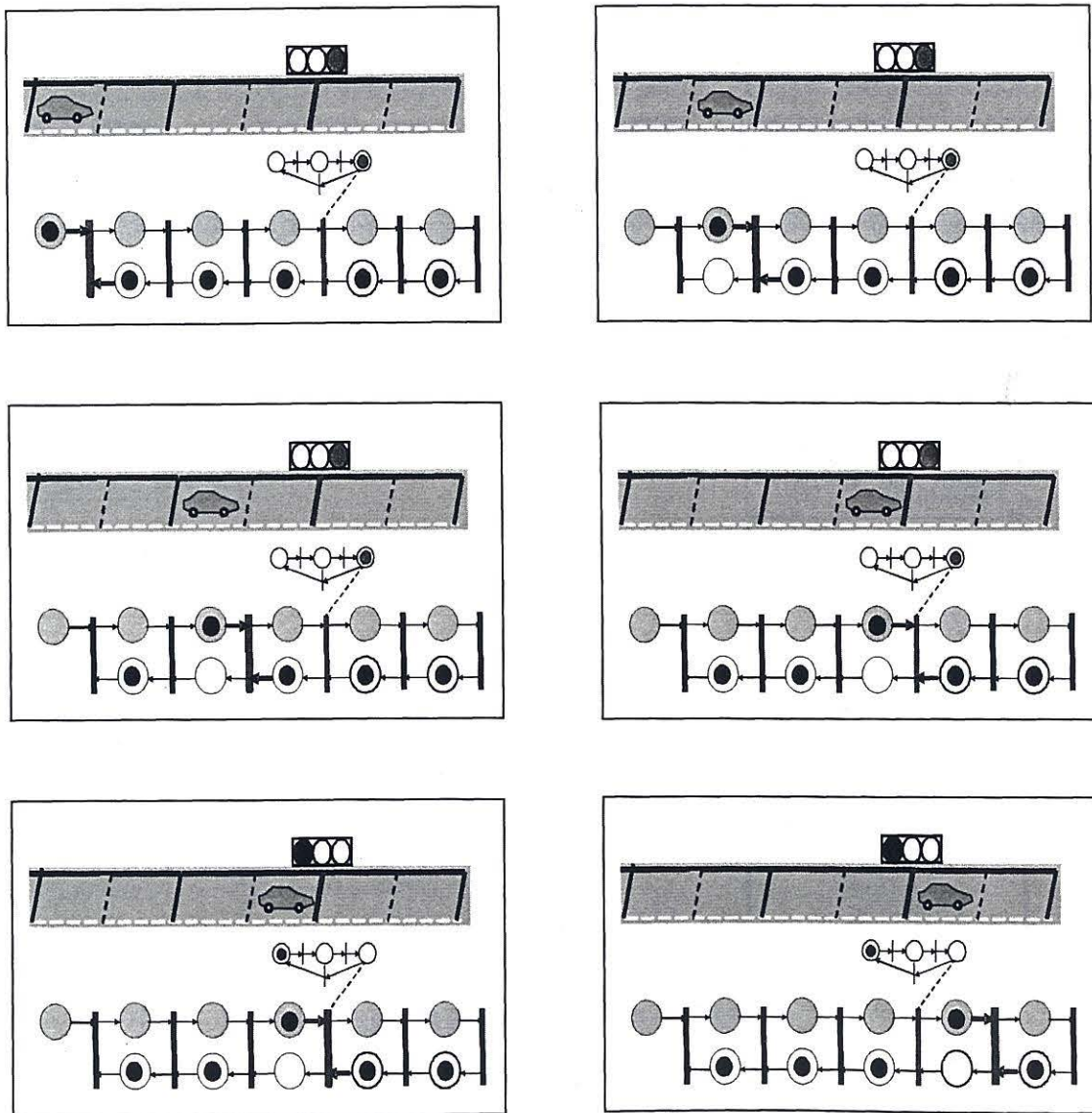


図 3-2-3 一般車交通流ネットの動的挙動

図 3-2-2 では、プレースの種類を区別するために、-2, -1, あるいは1 という数値が記載されている。-2 は“車両が存在”を意味し、-1 は“空間の空き”を意味する。これらのプレース上のトークンは、前者では実在の車両が対応し、後者では単なる状態の指示役割の記号となる。後者にはタイマは不要であるが、前者には必要で、具体的には当該閉塞区間の走行時間が設定される必要がある。その値は前の閉塞区間での走行時間（車速の逆数）に関係するために、交通流ペトリネットでは、表 3-2-1 に示す車速更新表ないしは図 3-2-4 に示すその実行ファイル Vptimer.txt を参照する形で決定される。即ち、走行中の現車速の維持ないしは加速走行という形でプレースタイマが更新されることになる。信号現示時間のような固定型に対して、この型を可変プレースタイマと呼び、プレース種類の区別を設けることでこの処理を可能にしている。

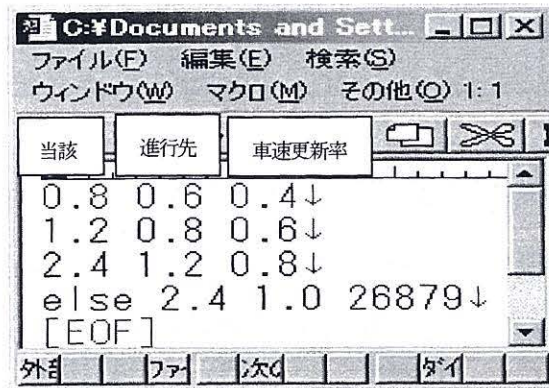


図 3-2-4 Vptimer.txt

表 3-2-1 車速更新表 (-2)

プレースタイマ更新表					
閉塞区間長L		6.7m			
当該閉塞区間		進行先閉塞区間		車速更新の確率化	
滞在時間(秒)	対応速度(km/h)	滞在時間(秒)	対応速度(km/h)	車速更新率	現状維持率
$t \leq 0.80$	$30 \leq v$	0.6	40	100	0
$0.8 < t \leq 1.2$	$20 \leq v < 30$	0.8	30	100	0
$1.2 < t \leq 2.4$	$10 \leq t < 20$	1.2	20	100	0
$2.4 < t$	$t < 10$	2.4	10	100	0

(2) 混在流の基本ペトリネットモデル

図 3-2-2 は、一般車みの交通流のネットである。これに大型車が加わった混在流の概念図とそのペトリネットモデルを図 3-2-5 に示す。概念図に示すように、大型車による道路空間の占有は、一般車のそれより大きい。このことは、図 3-2-5 に示すように、まず、一般車交通流の基本ネットを上段に配置し、下段に“大型車の存在”に対応するプレース(□)を配置し、次に、“空間の空き”を示すプレース(-1)を共有させて、一般車進行のトランジション(上段)の入出力には1個を、大型車進行のトランジション(下段)の入出力には2個をアークで関係付けることで、発火則もプログラムも変更することなく表現することが可能となる。このことは、図 3-2-5 のネットに、上述した R1~R4 の発火則を適用する形で、誰にでも手動で容易に確認することができるだろう。

大型車と一般車とでは、さらに加速特性に違いがある。この組み入れは、図 3-2-5 のネット図に示すように、“一般車の存在”を示すプレース型を-2, “大型車の存在”を示すプレース型を-3 で定義し、

Vptimer.txtを図3-2-6に示す形式(表3-2-2の更新表)に拡張化することで、トランジションの発火則もプログラムも変更することなく可能となる。即ち、図3-2-5のペトリネットモデルでは、一般車は、トランジションの発火則により、前方に1閉塞空間の空きがあれば、車速を図3-2-6に示すVptimer.txtの前半部を参照して更新し、進行する。大型車の場合の発火条件は2閉塞空間であることも、車速更新での参照が後半部であることも、図3-2-5のネット図に記載されており、変更の必要はない。

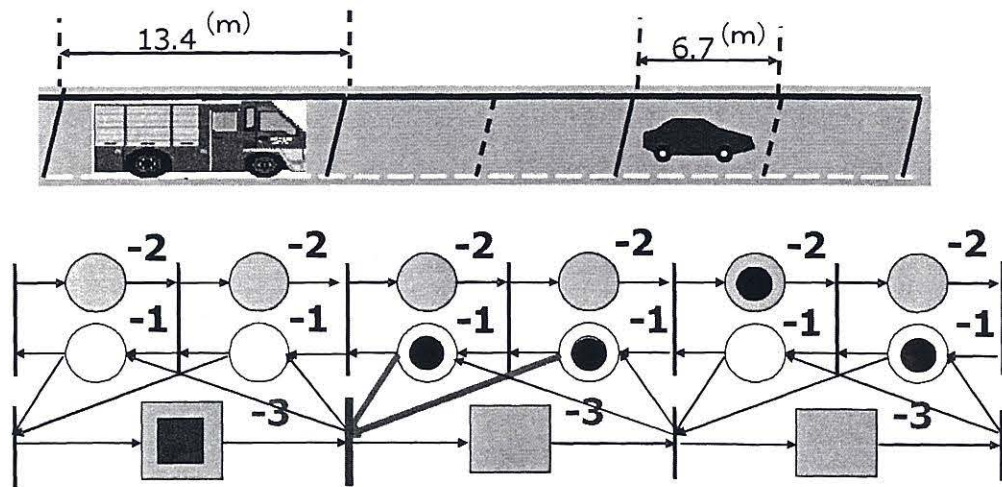


図3-2-5 大型車混在流の基本ペトリネットモデル

Vptimer.txt - メモ帳				
ファイル(F) 編集(E) 書式(O) ヘルプ(H)				
0.8	0.6	0.6		-2 プレース用
1.2	0.8	0.8		
2.4	1.2	0.8		
else	2.4	1.0	26879	
1.20	1.0373	1.00		-3 プレース用
1.40	1.20	1.00		
1.55	1.40	1.00		
1.75	1.55	1.00		
1.95	1.75	1.00		
2.35	1.95	1.00		
4.80	2.35	1.00		
else	4.799	1.00		

図3-2-6 Vptimer.txt

表 3-2-2 車速更新表（一般車・大型車）

ブレースタイマー更新表					
閉塞区間長 L		6. 7 m			
当該閉塞区間		進行先閉塞区間		車速更新の確率化	
滞在時間(秒)	対応速度 (km/h)	滞在時間(秒)	対応速度 (km/h)	車速更新率	現状維持率
$t \leq 1.2$	$20 \leq V$	0.6	40	60	40
$1.2 < t \leq 1.8$	$13.5 < V \leq 20$	0.8	30	80	20
$1.8 < t \leq 2.4$	$10 < V \leq 13.5$	1.2	20	80	20
$2.4 < t$	$V < 10$	2.4	10	100	0

ブレースタイマー更新表					
閉塞区間長 L		13.4m			
当該閉塞区間		進行先閉塞区間		車速更新の確率化	
滞在時間(秒)	対応速度 (km/h)	滞在時間(秒)	対応速度 (km/h)	車速更新率	現状維持率
$t \leq 1.2$	$40 \leq V$	1.037	50	100	0
$1.2 < t \leq 1.4$	$34.3 < V \leq 40$	1.2	40	100	0
$1.4 < t \leq 1.55$	$31 < V \leq 34.3$	1.4	34.3	100	0
$1.55 < t \leq 1.75$	$27.4 < V \leq 31$	1.55	31	100	0
$1.75 < t \leq 1.95$	$24.6 < V \leq 27.4$	1.75	27.4	100	0
$1.95 < t \leq 2.35$	$20.4 < V \leq 24.6$	1.95	24.6	100	0
$2.35 < t \leq 4.8$	$10 < V \leq 20.4$	2.35	20.4	100	0
$4.8 < t$	$V < 10$	4.799	10	100	0

3. 3 緊急車両走行のマイクロペトリネット構成

(1) 緊急車両走行の基本事象と走行空間の生成性確認

大型車である緊急車両の2車線道路の走行概念図を、図 3-3-1 の(1)~(3)に示す。即ち、図 3-3-1(1)は、緊急車両の進行方向車線と対向車線に一般車が走行している状態で、緊急車両からの“警報”が届いた状態を示している。図 3-3-1(2)は、“警報”の有効範囲内にある進行方向車線と対向車線の両方で、“一般車の退避運転”がなされ、道路中央に“緊急車両の走行空間”が生成される状況を示している。そして、図 3-3-1(3)では、生成された道路中央の“緊急車両の走行空間”に緊急車両が進出するとともに、“警報”の伝播も進行していくことを示している。

緊急車両走行のマイクロペトリネットは、3.3 の(2)で述べた一般車・大型車の混在流ネット、図 3-2-5 のネット図を基にし、まず、大型車=緊急車両と読み替え、上述した緊急車両の走行に伴う事象系、“警報”、“一般車の退避運転”、“緊急車両の走行空間”の生成と緊急車両の進出、および“警報”の伝播の基本部分ネットを構成し、結合化する形で、次項以降で順次開発して行く。

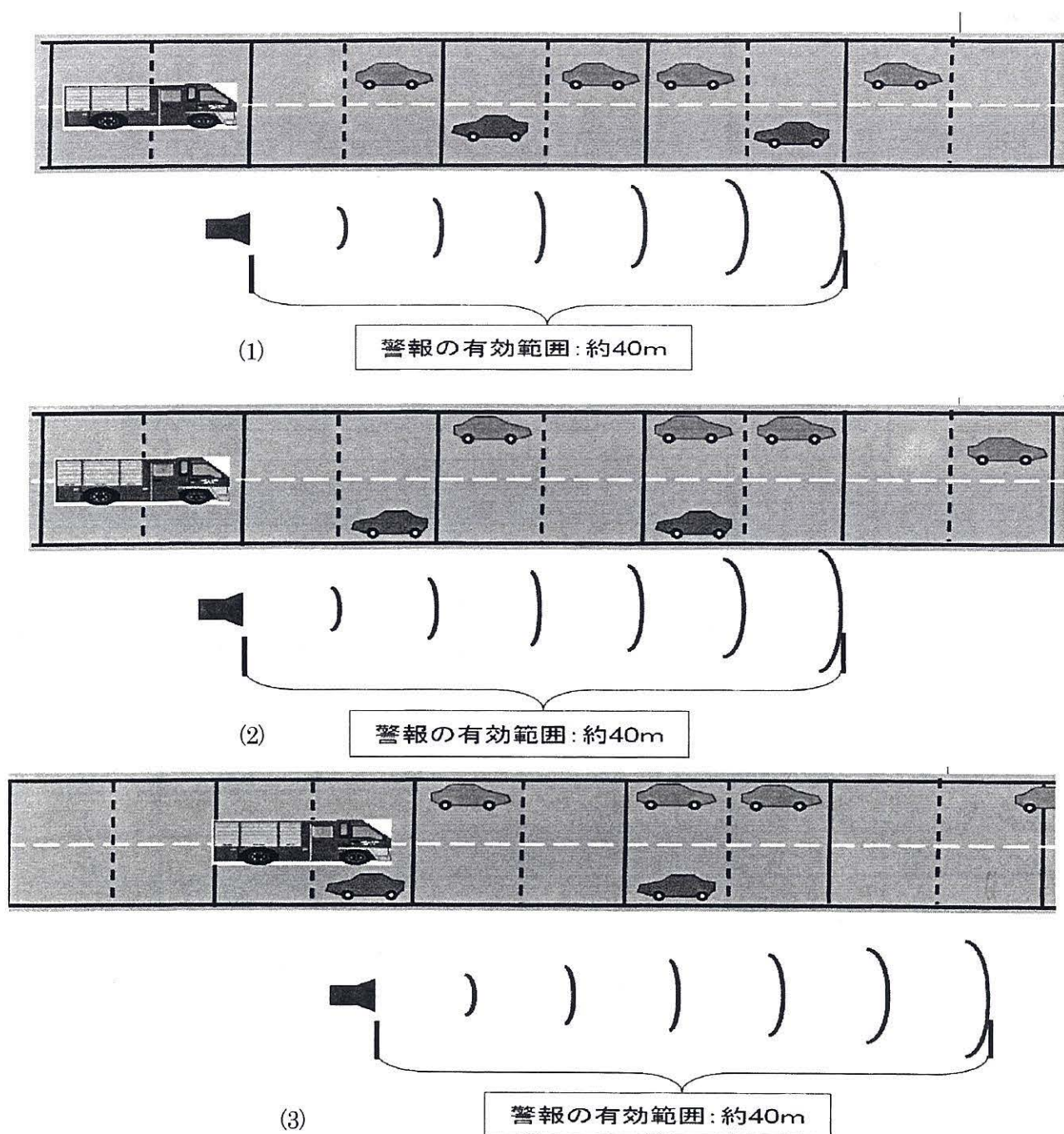


図 3-3-1 緊急車両走行の概念図

それに先立ち、ここでは、2車線道路と道路中央における“緊急車両の走行空間”の生成性の確認を、著者の主張の一つであるペトリネットの実空間対応性との関係で行う。

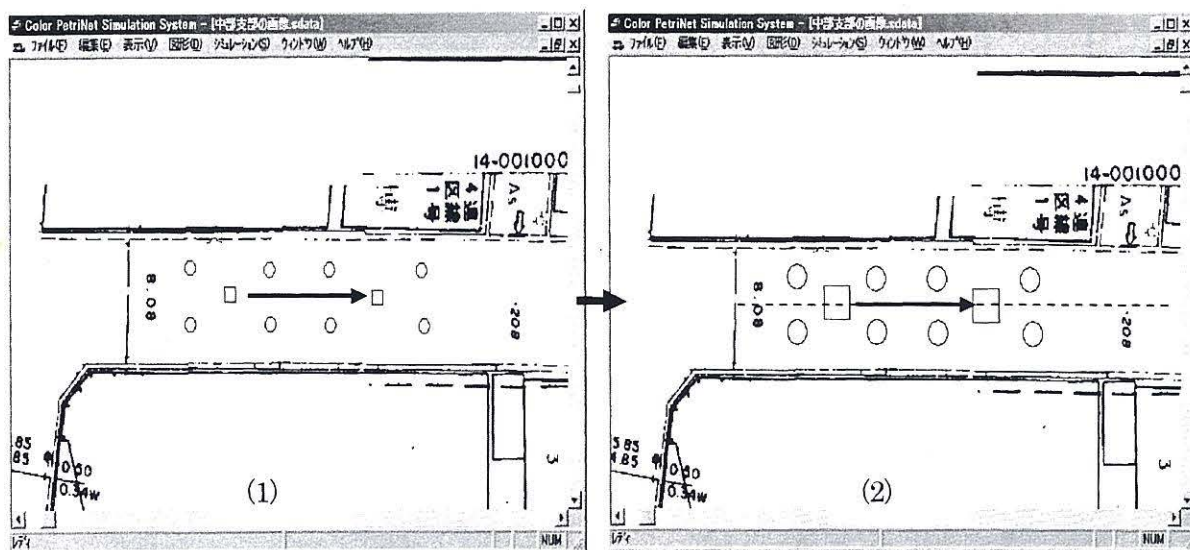
図 3-3-2(1)は、図 3-2-5 のネット図の一部を、ペトリネットシミュレータを用いて、実道路を背景画像とする形で構成し、一般車 (○) と緊急車両 (□) のプレースの配置画面を示したものである。2章で述べたように、この画面の表示に対応する座標データが、Ndata 形式で自動生成される。その一部を示したものが画面の下方に示す表で、プレースの中心座標 (x, y) とその半径ないしは半边 (radius) のサイズが示されている。

このリストの0～7が一般車 (○) のデータで、8, 9が緊急車両 (□) のデータである。その半径ないしは半边の2倍が、それぞれの車幅ということになる。図 3-3-2(2)は、この半径と半边の数値をそれぞれ変

更し、再表示させたもので、この操作によって、実道路空間に対応する形で、一般車（○）と緊急車両（□）の車幅を反映させたプレースの配置画面にすることができることを示すものである。

具体的には、ペトリネットシミュレータの画面データは、ピクセル単位となっている。そこで、図 3-3-3 に示すように、背景画像の道路の幅員（8.08mと表記）をウインルーラーで計測し、1mのピクセル換算を行い、図 3-3-4 に示す一般車と緊急車両の車幅のデータより、それぞれの平均値（m）をピクセル換算することとで、変更値を求められることができる。

ペトリネットシミュレータの画面では、プレース等の配置はドラッグで移動できる。図 3-3-5 は、この機能を用いて一般車のプレースを退避・停車位置に移動させて、中央の緊急車両のプレースとの間に出来る余裕空間の計測を行っているものである。この計測値（ピクセル値）を逆にm単位に換算することで、対象道路で生成される“緊急車両の走行空間”に関して、われわれが感覚的に判断できる数値を求めることが可能となる。この道路では、退避一般車との間に 1.3mの余裕空間を保てることが分かる。



PLACE	absolute position	x,	y	radius
0	339	179	8	
1	453	168	8	
2	584	179	8	
3	705	179	8	
4	356	335	8	
5	475	324	8	
6	583	327	8	
7	673	335	8	
8	404	253	8	
9	635	251	8	

PLACE	absolute position	x,	y	radius
0	339	179	12	
1	453	168	12	
2	584	179	12	
3	705	179	12	
4	356	335	12	
5	475	324	12	
6	583	327	12	
7	673	335	12	
8	404	253	16	
9	635	251	16	

図 3-3-2 プレースサイズの変更と配置

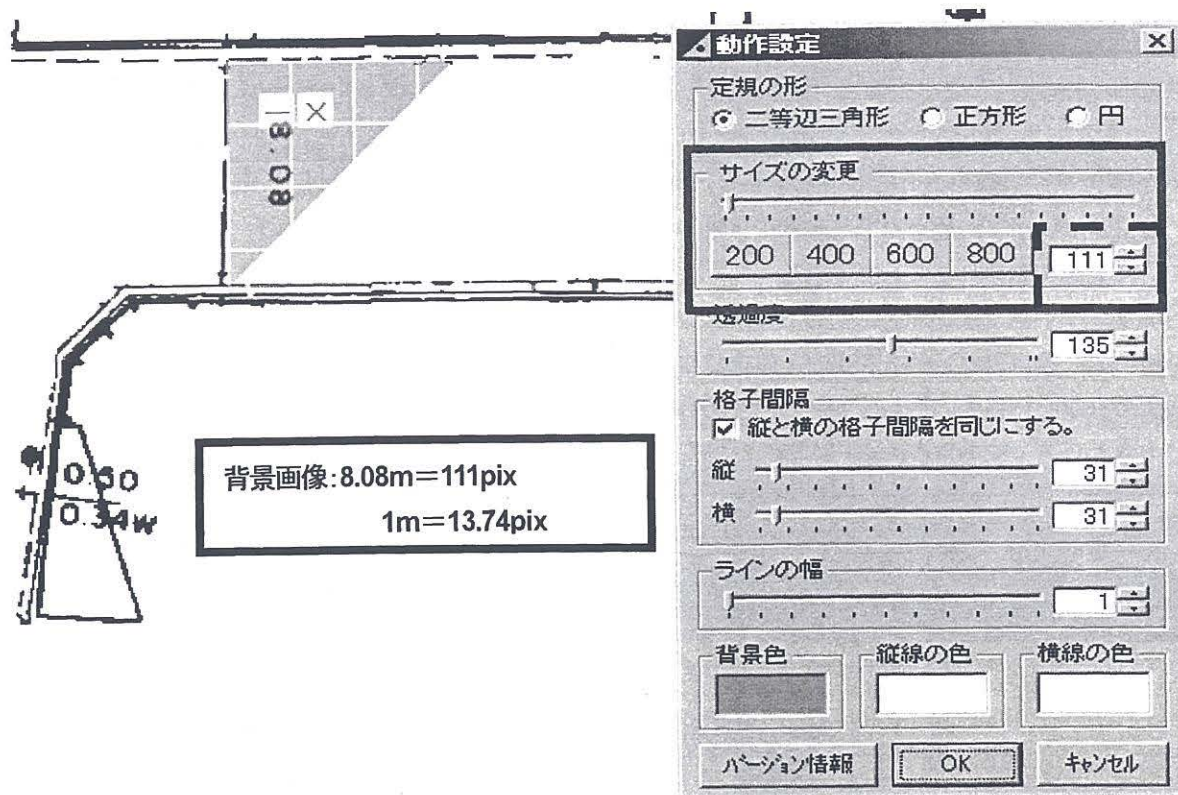


図 3-3-3 背景画像のピクセル計測作業

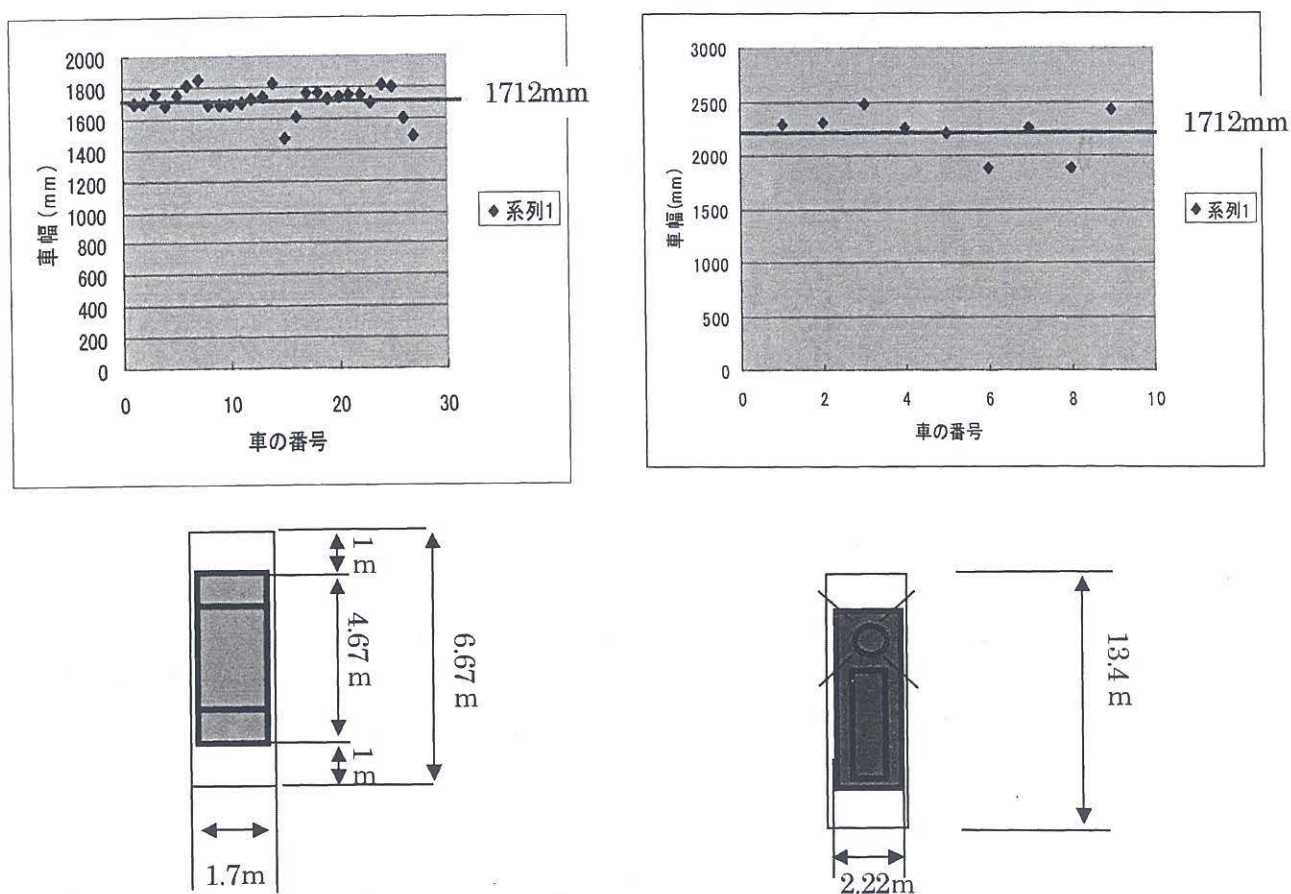


図 3-3-4 一般車・緊急車両の車幅の平均値

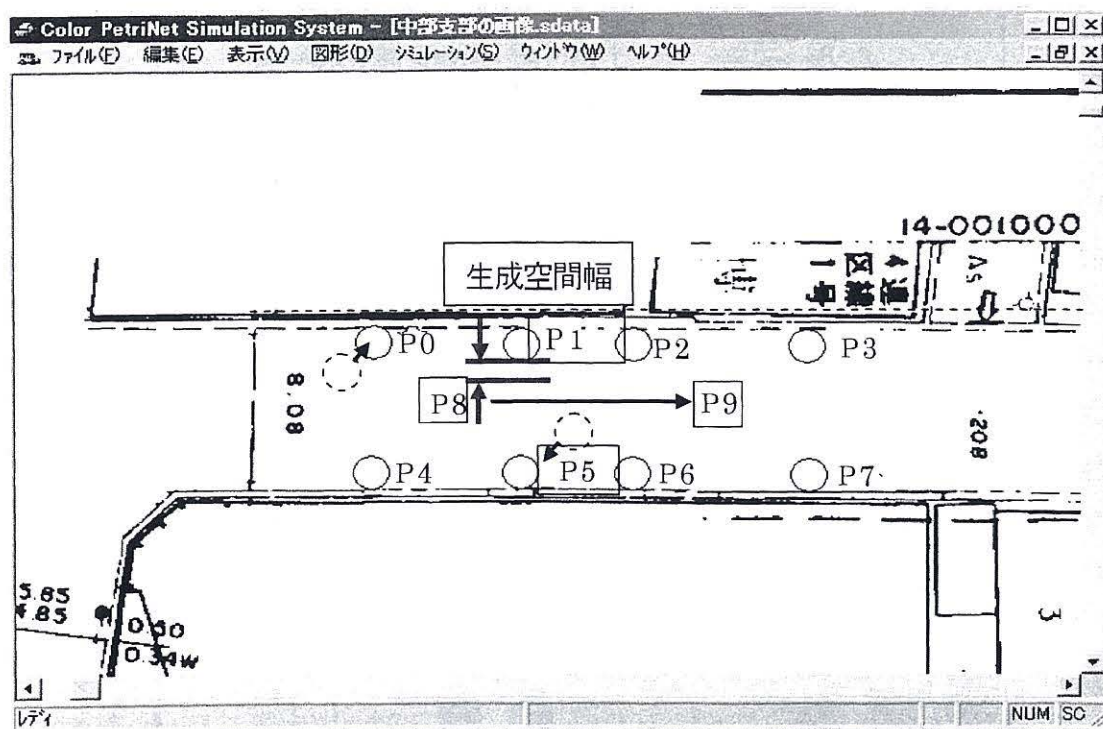


図 3-3-5 背景画像上でのプレース配置と生成空間確認

(2) 単路部の緊急車両走行ネットの構成

1) 一般車退避運転の基本ネット

一般車は、緊急車両からの警報を認知すると、減速し、路肩へと退避し、停車する。図 3-3-6(1)は、この退避運転の基本ペトリネットである。中央が、図 3-3-2 に示した車両進行の基本ネットで、これに退避運転開始のトランジション T4 から始まる退避運転部のネットを結合したものである。

退避運転開始の条件は、“警報の認知”と前方の“空間の空き”である。そのために、この図の下方に、警報の状態を示すプレース、P7（非警報中）と P8（警報中）を設けて、まず、P7（非警報中）から退避運転開始のトランジション T4 に抑止アークを設定し、そのトークンが P8（警報中）へ移動し抑止が解除されたときにという設定を行い、さらに、T4 の入力アークとして前方の“空間の空き”を設定することで、上記の 2 つの条件を満たすとき、そのときに限り退避運転がなされ、P5 に設定する減速時間を消費して、路肩停車状態、p6 に達する。

図 3-3-6(2)は、この退避運転に要する時間は、ドライバーによっても違おうとし、T4 をカラー生成トランジションとし、T5 の選択トランジションで、生成されたカラーによって、通常の退避時間（P9）か遅めの退避時間（P10）へと選択的に出力させることで、この退避運転の行動特性の組み込みを行うものである。

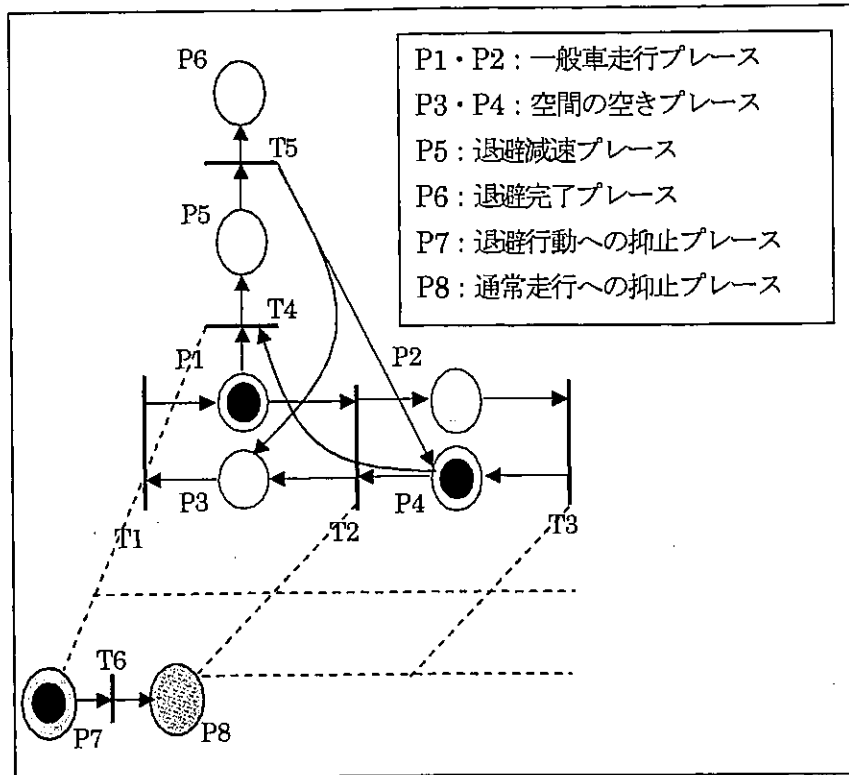


図 3-3-6 (1) 一般車退避運転の基本ネット

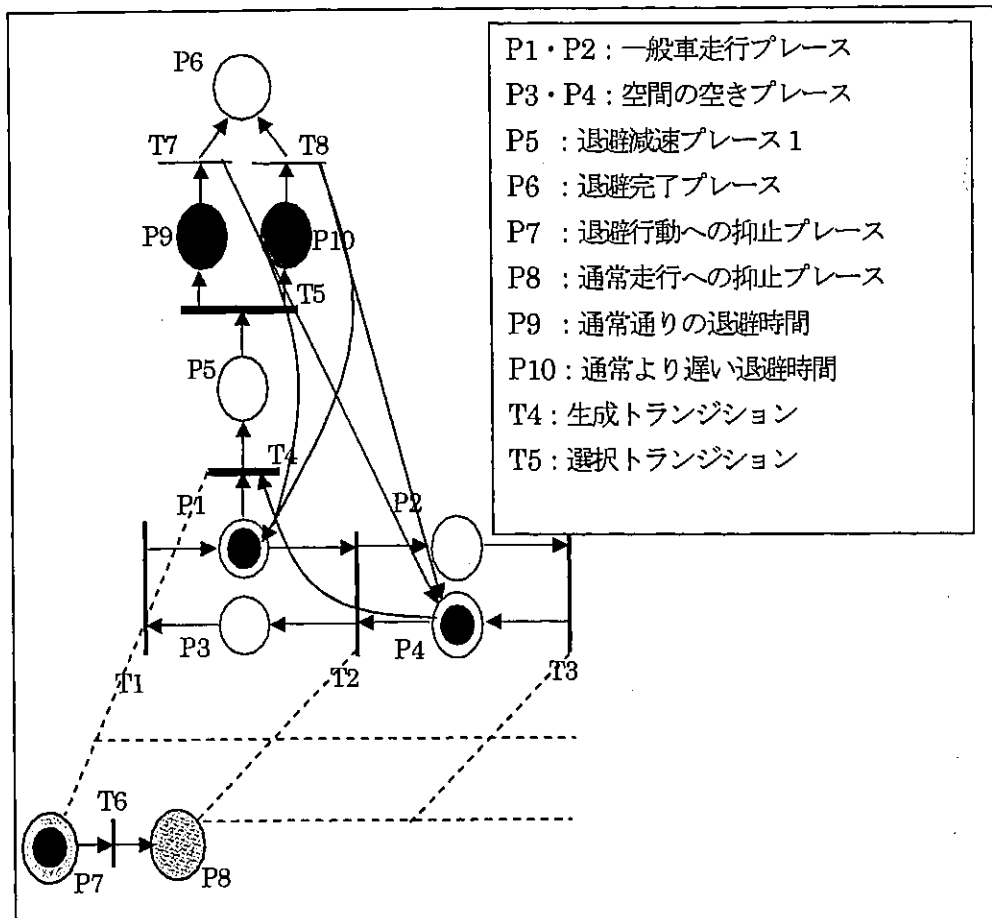


図 3-3-6 (2) 確率挙動の退避ネット

2) 緊急車両進行の基本ネット

図 3-3-7(1)は、上述のネットを結合させ、さらに口のプレースで表記する緊急車両の進行部を、混在流のネットの構成と同形式で結合化させたものである。即ち、大型車である緊急車両の進行トランジションの入出力プレースは、2個の“空間の空き”となる。この空きが、一般車の退避運転で強制的に生成されるというのが緊急車両進行の基本ネットである。

図 3-3-7(2)は、図 3-3-7(1)の形のネットに、対向車線の一般車の走行ネットと、そこでの退避運転ネットを結合させたもので、3-3 の(1)で想定したような道路ランクでの緊急車両進行の基本ペトリネットである。即ち、中央ライン上の左右に、それぞれ2個の“空間の空き”が存在するときに緊急車両が進行するというネット記述となっている。

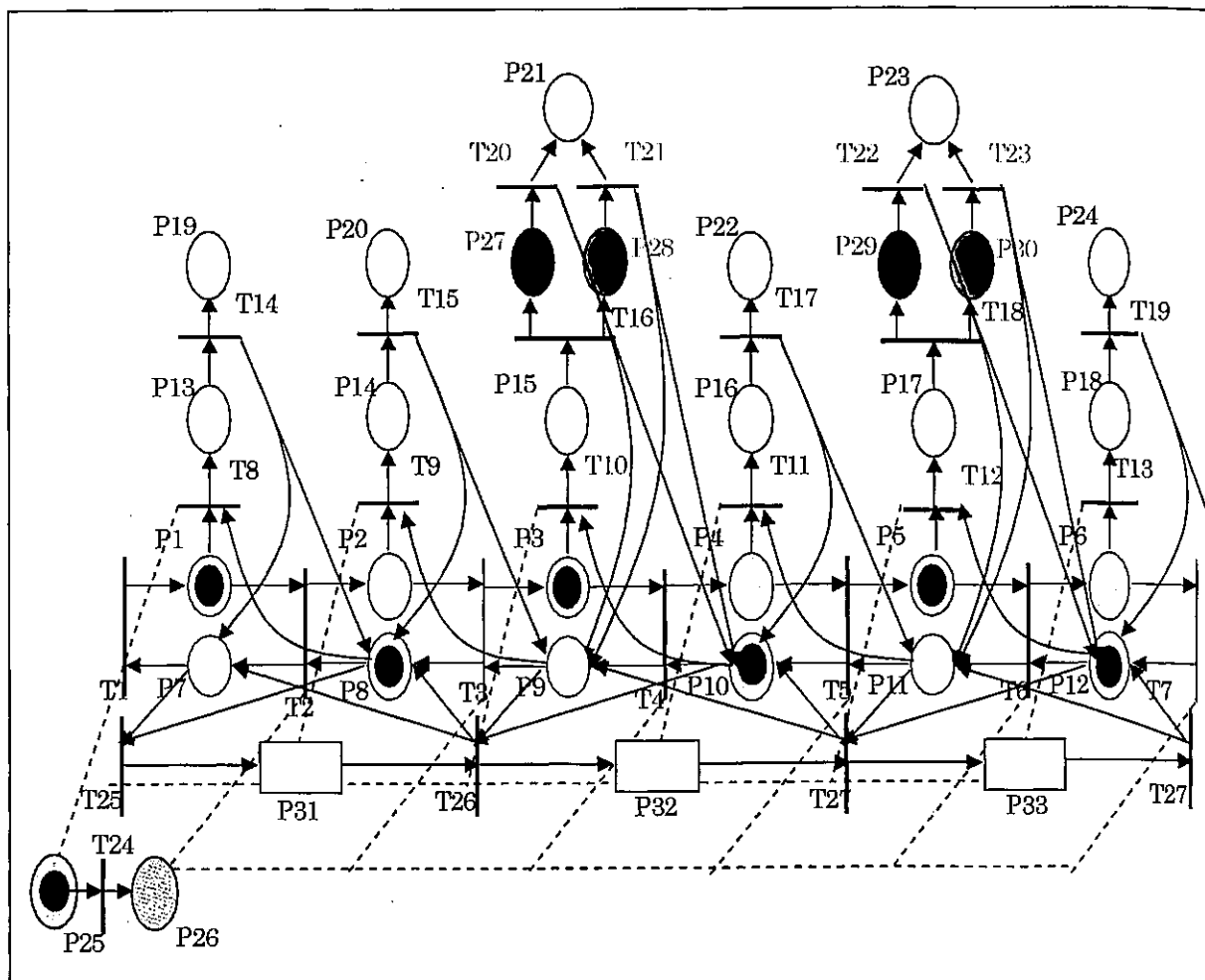


図 3-3-7 (1) 緊急車両進行の基本ネット

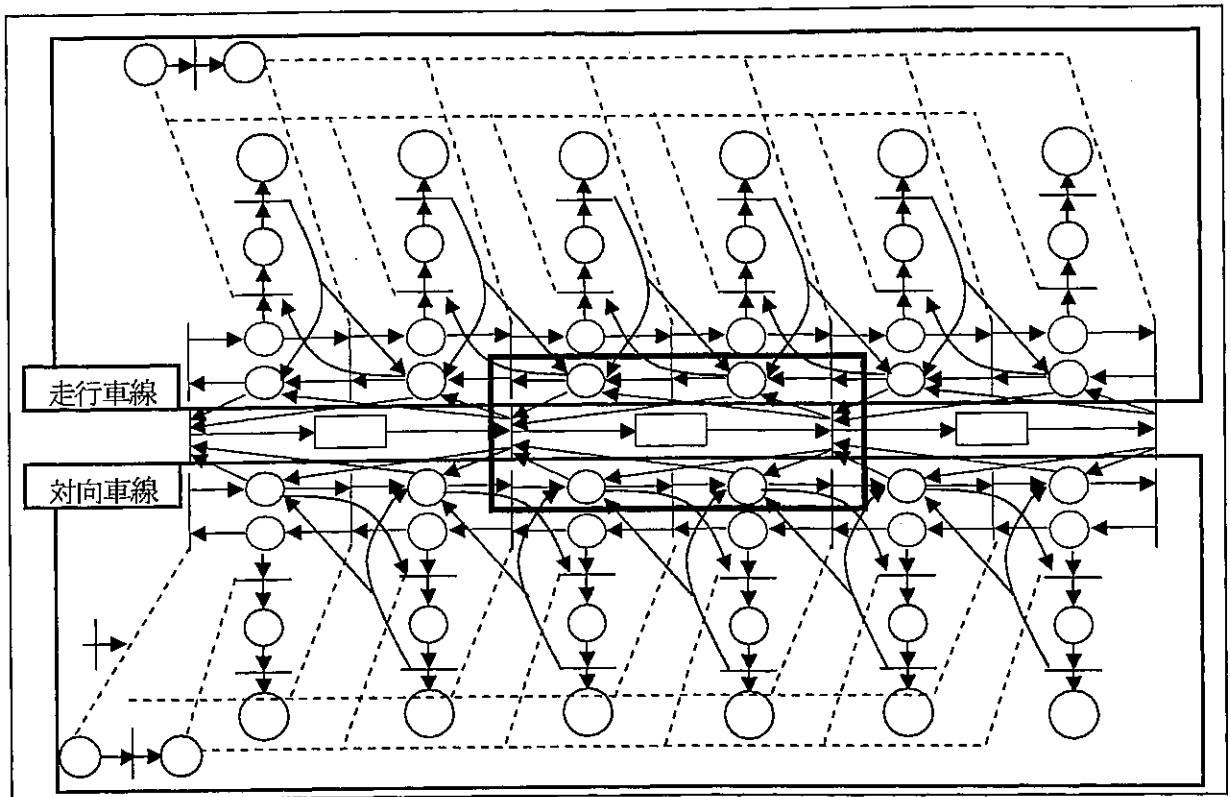


図 3-3-7 (2) 緊急車両進行の基本ネット

3) 緊急車両の単路部走行ネット

緊急車両が前方へ進行すると警報も伝播して行く。図 3-3-8(1)は、図 3-3-7(2)にこの部分を追加したものである。単路部の走行ネットは、これに緊急車両の出発ないしは当該道路への進入部ネットを追加することで構成される。図 3-3-8(2)は、図 3-3-8(1)の前方にこの部分を結合化したものである。具体的には、出発基地のプレースと、進入道路までの取り付き部分のプレースとして、P1、P2の2個を用意し、進入道路上に緊急車両が入るための“空間の空き”を2個分確保するために、それらのプレースから、進行方向の一般車の進行トランジションT1と、対向車線側の進行トランジションT2への抑止アークを設けている。

この確保2区間に既にいる一般車については、緊急車両の進行トランジションに設定している入力条件から、自動的にそれらがこの区間の走行を完了するまで、緊急車両の方が待機する形となる。緊急車両の単路部走行ネットは、図 3-3-8(2)のネットの後に、図 3-3-8(1)のネットを単路部の長に応じて結合化することで構成される。

(3) 信号交差点部の緊急車両走行ネットの構成

1) 信号交差点走行の基本システムネット

信号交差点部の走行ネットは、図 3-3-8(1)の単路部の走行ネットに、まず、交差交通流のネットを結合化させ、さらに、信号ネットを結合させることによって構成させる。図 3-3-9(1)は、そのようにして構成した基本システムネットである。中央の□が緊急車両の走行プレースで上方のネットが、緊急車両の進行方向と同方向に向かう一般車ネットで、退避運転ネットも表記している。また、交差点部での右左折の部分ネットも表記している。上方のネットは、対向車線の交通流ネットで、ここでは退避運転ネット等は省略している。

縦の一般車の走行ネットが交差交通のネットで、右が上方から下方への、左が下方から上方へのネットで

ある。下方から上方へのネットでは、緊急車両との接触性からやはり右左折の部分ネットを表記してある。

最下方に示す信号ネットについては、図 3-2-2 に示した一般車の交通流ネットを使用したものに、2) の項で述べる特殊な行動を組み入れるために、若干手を入れたものとなっている。図 3-3-9(2)でこのネットの説明をする。

P1, P2, P3 が、それぞれ青、黄、赤の現示スペースで、T1, T2, T3 が現示の切り替えスペースである点は同じであるが、青と赤の現示時間は、P4 と P5 のプレースタイマで設定する点に違いがある。もちろん現示時間の消費とともに現示表示が切り替わるという挙動は、元の信号ネットと同じである。このことは、発火則の適用で容易に確認できる。

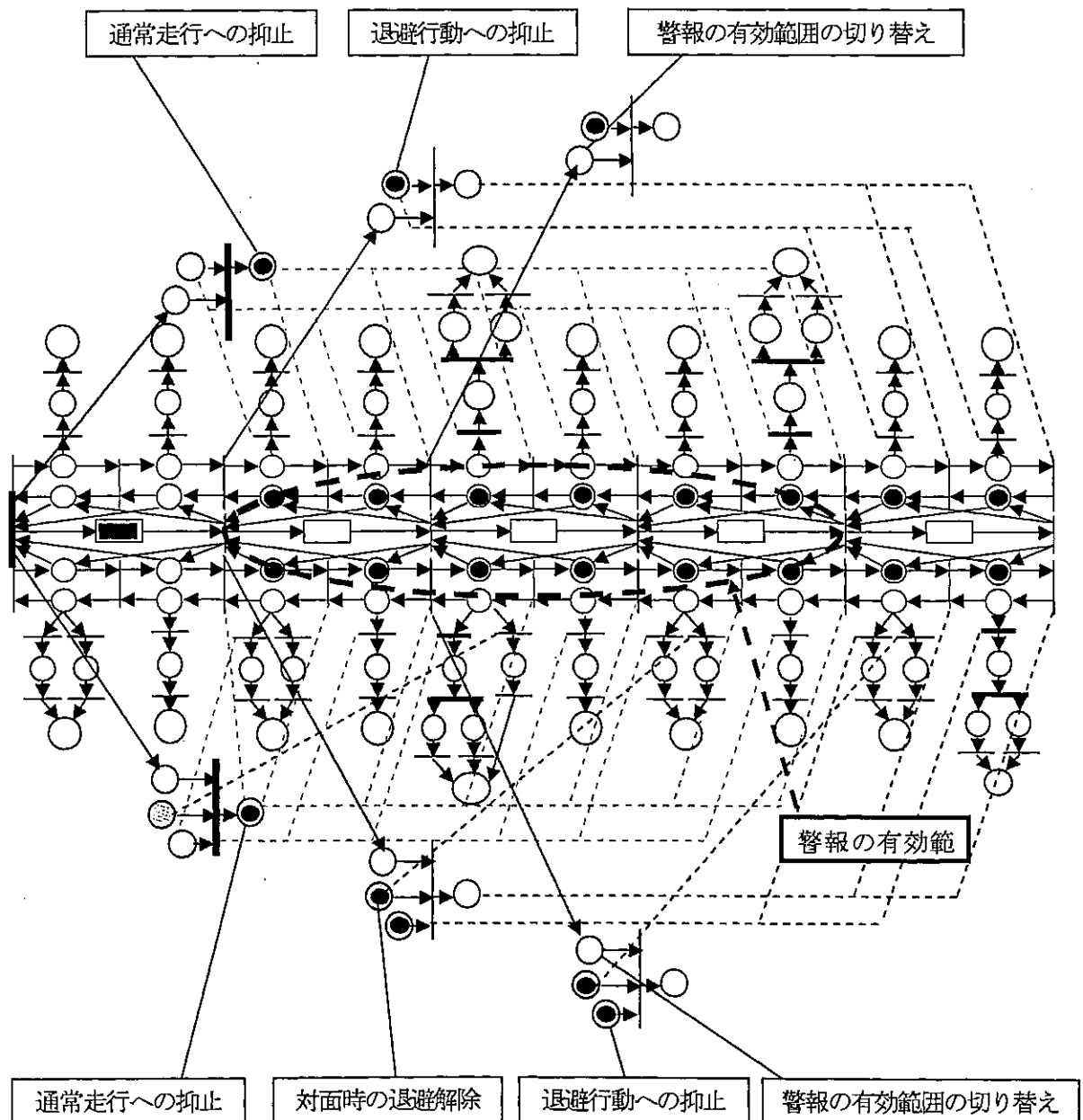


図 3-3-8 (1) 単路部のシステムネット

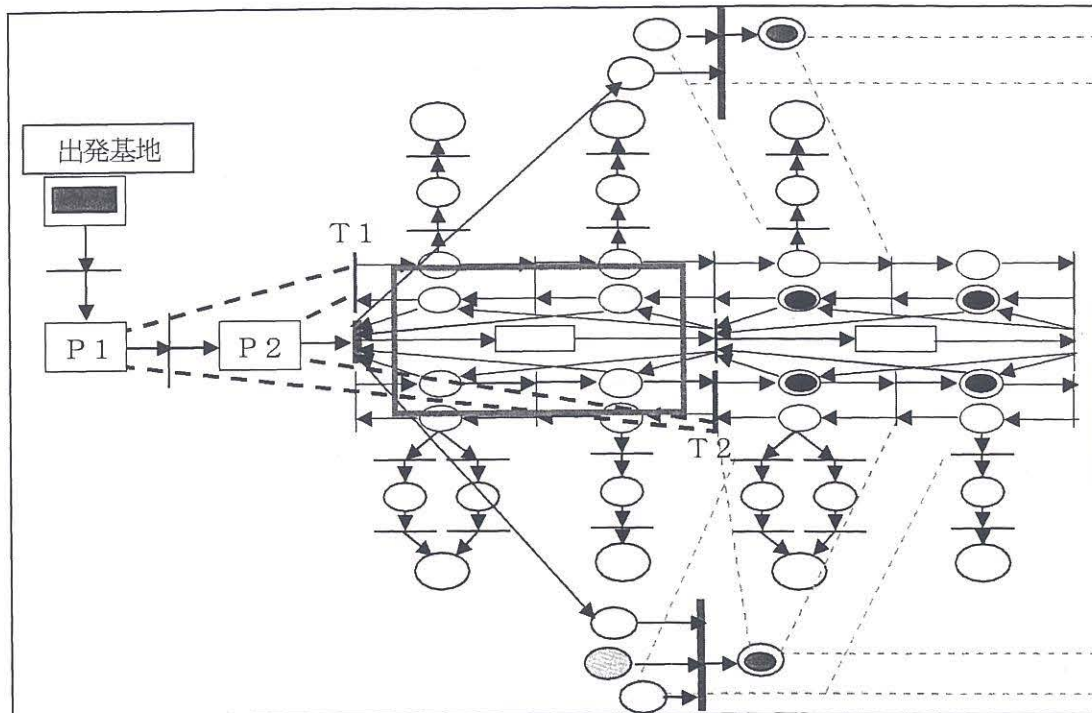


図 3-3-8 (2) 緊急車両進入部ネット

2) 緊急車両の交差点進入確保ネット

図 3-3-9(1)では、左が主交通流の信号で、右が交差交通流の信号である。図 3-3-9(2)で述べたように、この信号現示状態は、トークンの配置位置から主交通流側が赤で、交差交通流が青となっていることが分かる。そして、交差点手前に一般車が停車していて、その後に緊急車両が到達した状況である。このとき、交差点手前で停車中の先頭車は、交差交通への不安から交差点内への退避運転が困難となる。緊急車両についても同様の不安を抱えており、誘導員を降車させて、交差交通の規制に向かわせている。図 3-3-10 は、この行動ネットを結合化し、交差点を全赤状態にするネットである。

下方のT1～T4に至るネットが、誘導員を降車させて、交差交通の規制に向かわせるネットで、ここでもその時間特性を生成・選択トランジションを用いて考慮している。P5 が早目のプレースで、P6 が遅目のプレースである。信号ネットには、T5 というトランジションを付加し、青のタイマ時間を消費することなく、黄から赤に切り替えが可能な工夫をしてある。通常時には、P8 にトークンを配置しておき、そこからの抑止で、このT5 というトランジションを無効化しておき、誘導員が到着し、T4 を発火させたときにそのトークンを消滅させることで、交差点を全赤状態での制御状況に導くというものである。

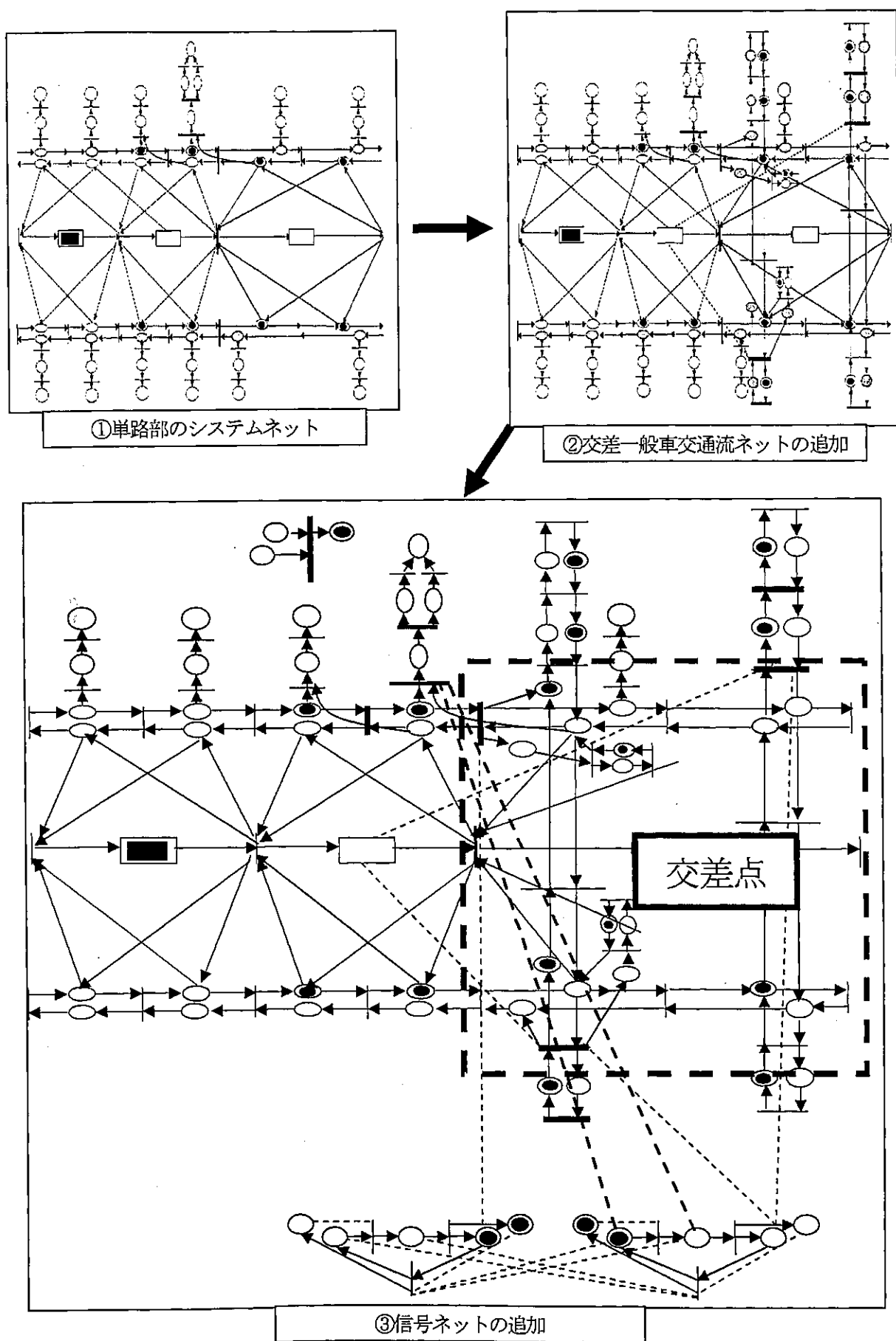


図 3-3-9 (1) 信号交差点走行の基本システムネット

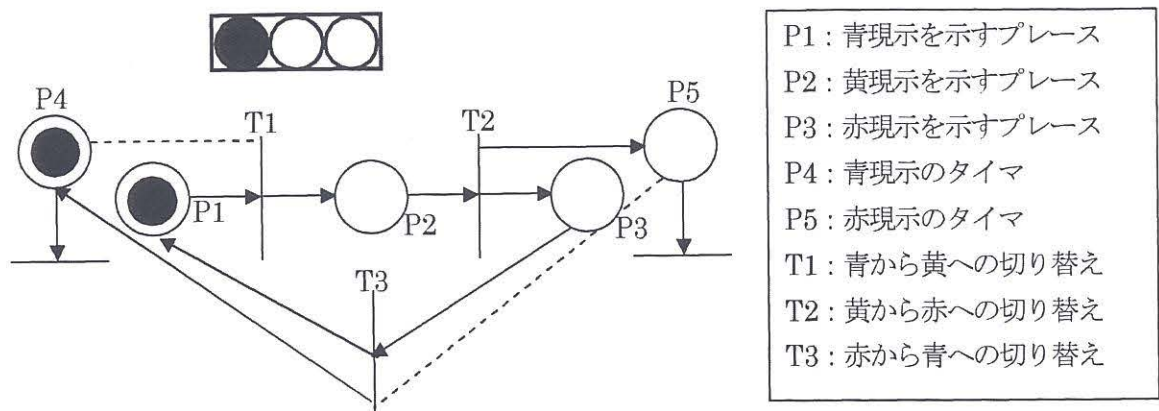


図 3-3-9 (2) 修正信号ペトリネット

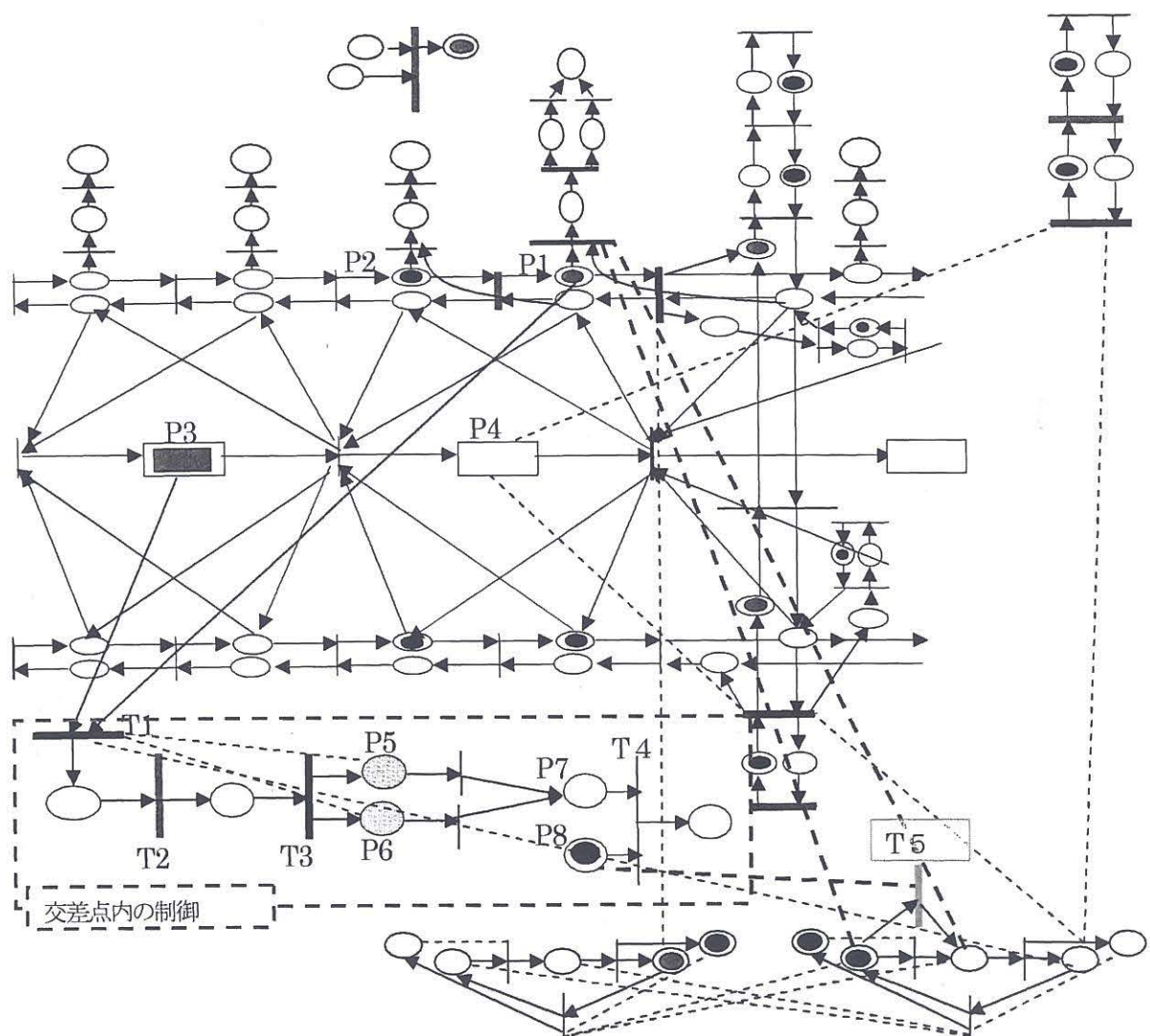


図 3-3-10 誘導員による交差交通規制ネット

3. 4 一般車交通による緊急車両走行阻害のシミュレーション実行

(1) シミュレーション・システムネットの構成

対象道路を2車線道路とし、600m強の道路での走行シミュレーションを試みる。図3-4-1に、このシミュレーションで使用するシステムネットの構成図を示す。図に示すように、信号交差点を2箇所考慮することが可能なネットと成っている。

一般車と緊急車両の走行特性は、表3-4-1のVptimer表に示すようなもので、一般車に比べて緊急車両の更新率が高く設定してある。また、最高速度については、それぞれ30Km/hと50Km/hとなっている。

遇踏運転のタイムは、1.6秒を標準にし、3秒の遅延者が10%程度存在するとする。また、誘導員による規制については、10秒か20秒かのいずれかが50%で起きるとしている。もちろんこれらの変更は容易に行えるが、調査となるとなかなか難しい。

(2) シミュレーション結果と考察

図3-4-1に示すシステムネットを基礎に、

- a) 緊急車両の進行方向の一般車交通量(台/時)
 - b) 緊急車両の対向方向の一般車交通量
 - c) 交差交通の一般車交通量(両方向共通)
- を変化させて、緊急車両の旅行速度(Km/h)を、
- i) 出発～第一交差点手前までの区間(360m)
 - ii) 単路部の短区間(67m)
 - iii) 同長区間(241m)
 - iv) 第一交差点を含む区間(94m)
 - v) 第一交差点を含む区間(94m)
 - vi) 全区間(603m)

で計測する。

緊急車両の走行性は、上述したように、交差点に差し掛かったときの信号の現示状態に大きく影響される。そこで、各シミュレーションケースでは、緊急車両の進入タイミングを10秒単位で変化させ、シミュレーション開始後100秒から10秒刻みで220秒までの13ケースで実施し、それぞれをさらに乱数初期値を変更して繰り返すこととした。

表3-4-2に、a)～c)の全ての交通量を900台/時としたときの13ケースの2回繰り返し結果の各平均値を示す。図3-4-2は、これらの値を計測区間単位でプロットしたものである。この分析では、緊急車両から見た信号の現示状況を、直前と100m手前の両方で記録してある。緊急車両の交差点通過の記述ネットからも推測されるように、青現示タイミングでの通過時の旅行速度が高く、各計測区間で大きく分散している。全体を見ると分散は小さくなるが、交差点での旅行速度の低下が影響しているといえよう。

交通量の影響を見るために、図3-4-3(1)に、a) = b) = 900, c) = 600と、交差交通量が1/3少ないケースの結果を示す。交差点の走行性は良くなっているが、全体の旅行速度は少し改善される程度である。これは単路部の旅行速度には変化がなく、これが大きく占めることによる。

図3-4-3(2)は、a) = 600, b) = 0, c) = 240と交通量が減少し、対向車の影響がないケースでの結果を示したものである。単路部の旅行速度は40Km/hに達し、交差点では低下するが、全体でも25 Km/hとなっており、対向車による阻害の影響が大きく出ていると推測される。この対向車交通が0という状況は、いわゆる全赤制御によってももたらされるものであり、次節は、この制御法について論じる。

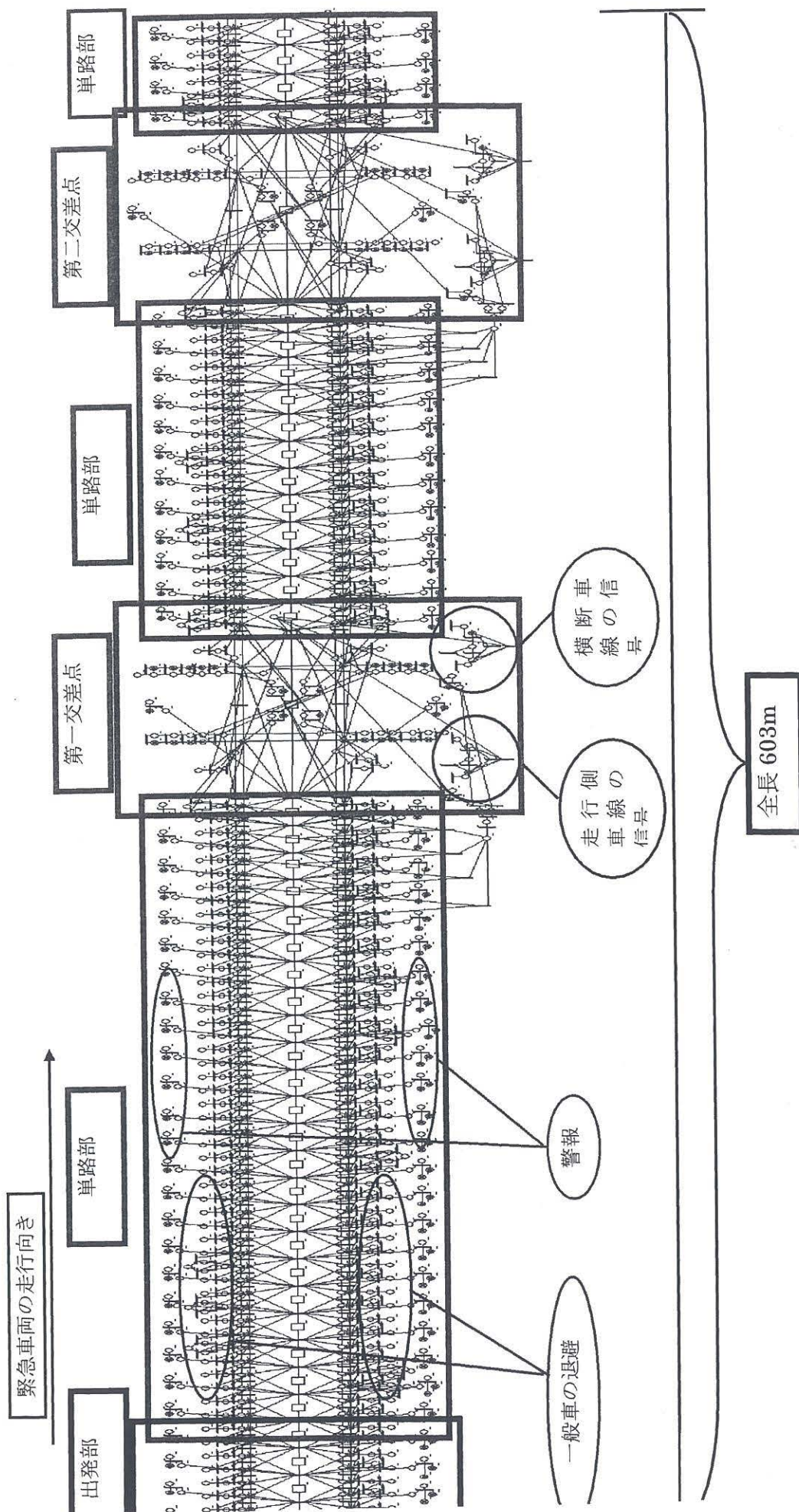


図 3-4-1 シミュレーションシステムネットの構成

表 3-4-1 車速更新表（一般車・緊急車両）

ブレースタイマー更新表					
閉塞区間長L		6. 7 m			
当該閉塞区間		進行先閉塞区間		車速更新の確率化	
滞在時間(秒)	対応速度 km/h	滞在時間(秒)	対応速度 km/h	車速更新率	現状維持率
$t \leq 1.2$	$20 \leq V$	0.6	40	60	40
$1.2 < t \leq 1.8$	$13.5 < V \leq 20$	0.8	30	80	20
$1.8 < t \leq 2.4$	$10 < V \leq 13.5$	1.2	20	80	20
$2.4 < t$	$V < 10$	2.4	10	100	0

ブレースタイマー更新表					
閉塞区間長L		13.4m			
当該閉塞区間		進行先閉塞区間		車速更新の確率化	
滞在時間(秒)	対応速度 km/h	滞在時間(秒)	対応速度 km/h	車速更新率	現状維持率
$t \leq 1.2$	$40 \leq V$	1.037	50	100	0
$1.2 < t \leq 1.4$	$34.3 < V \leq 40$	1.2	40	100	0
$1.4 < t \leq 1.55$	$31 < V \leq 34.3$	1.4	34.3	100	0
$1.55 < t \leq 1.75$	$27.4 < V \leq 31$	1.55	31	100	0
$1.75 < t \leq 1.95$	$24.6 < V \leq 27.4$	1.75	27.4	100	0
$1.95 < t \leq 2.35$	$20.4 < V \leq 24.6$	1.95	24.6	100	0
$2.35 < t \leq 4.8$	$10 < V \leq 20.4$	2.35	20.4	100	0
$4.8 < t$	$V < 10$	4.799	10	100	0

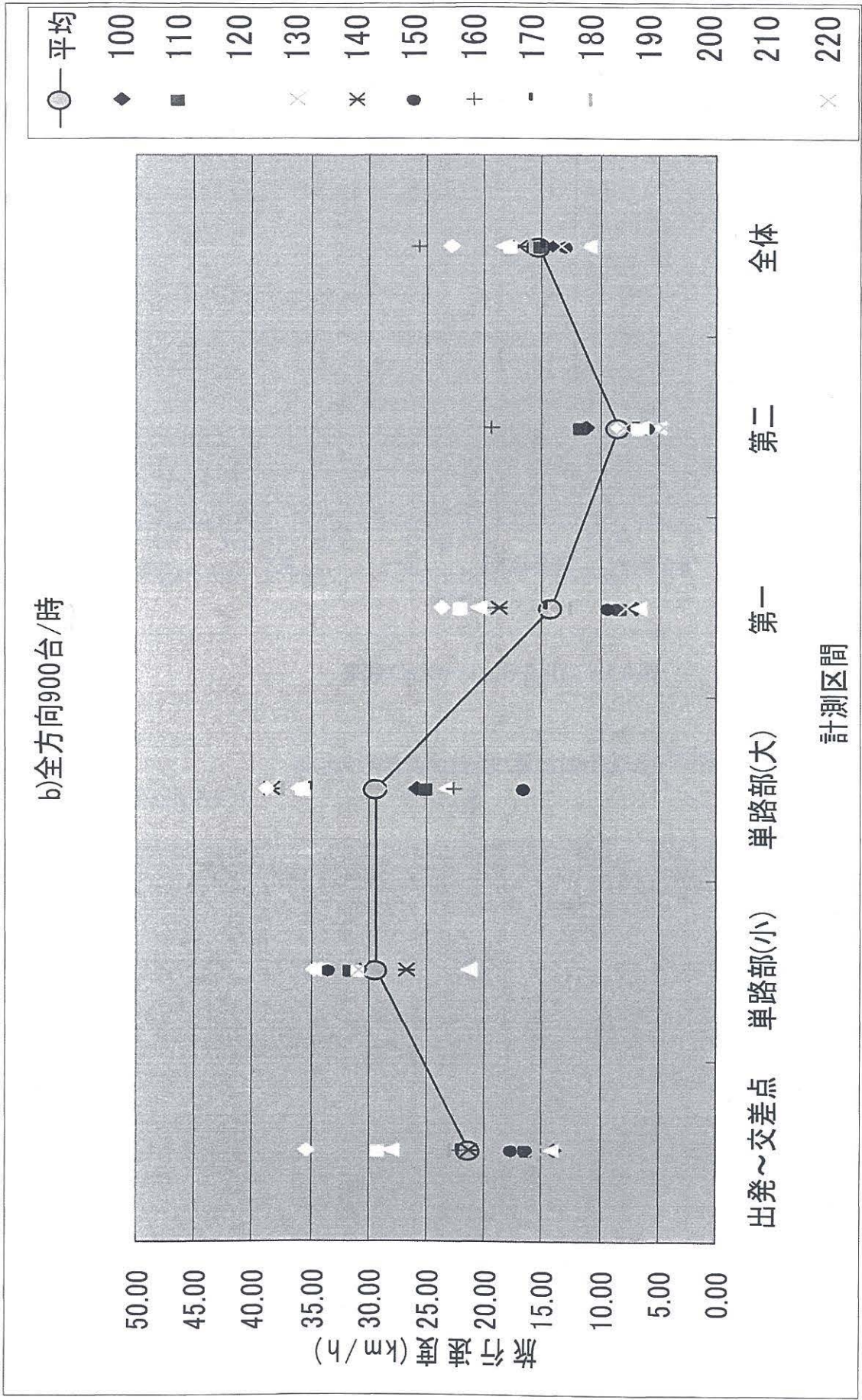


図 3-4-2 シミュレーション結果 (交通量すべて 900 台/時)

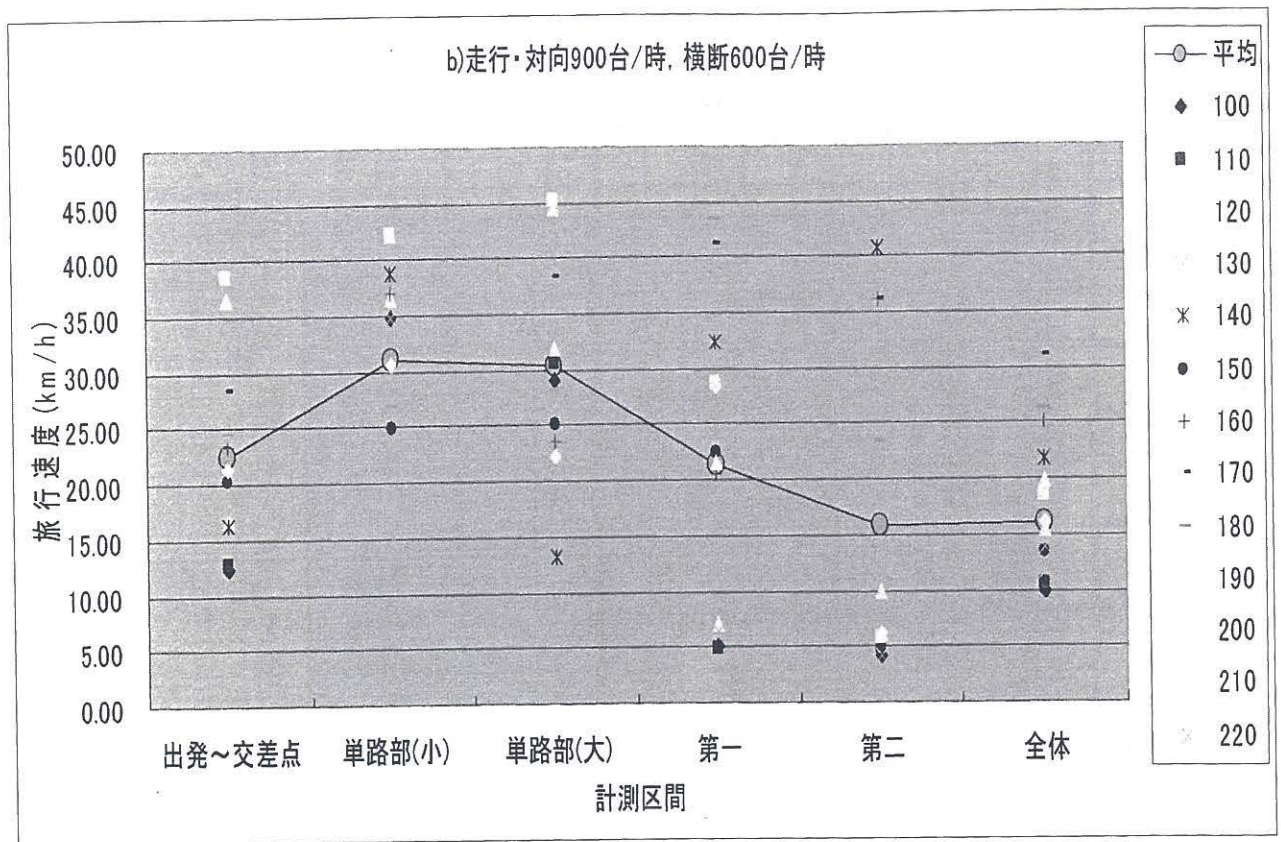


図 3-4-3 (1) シミュレーション結果

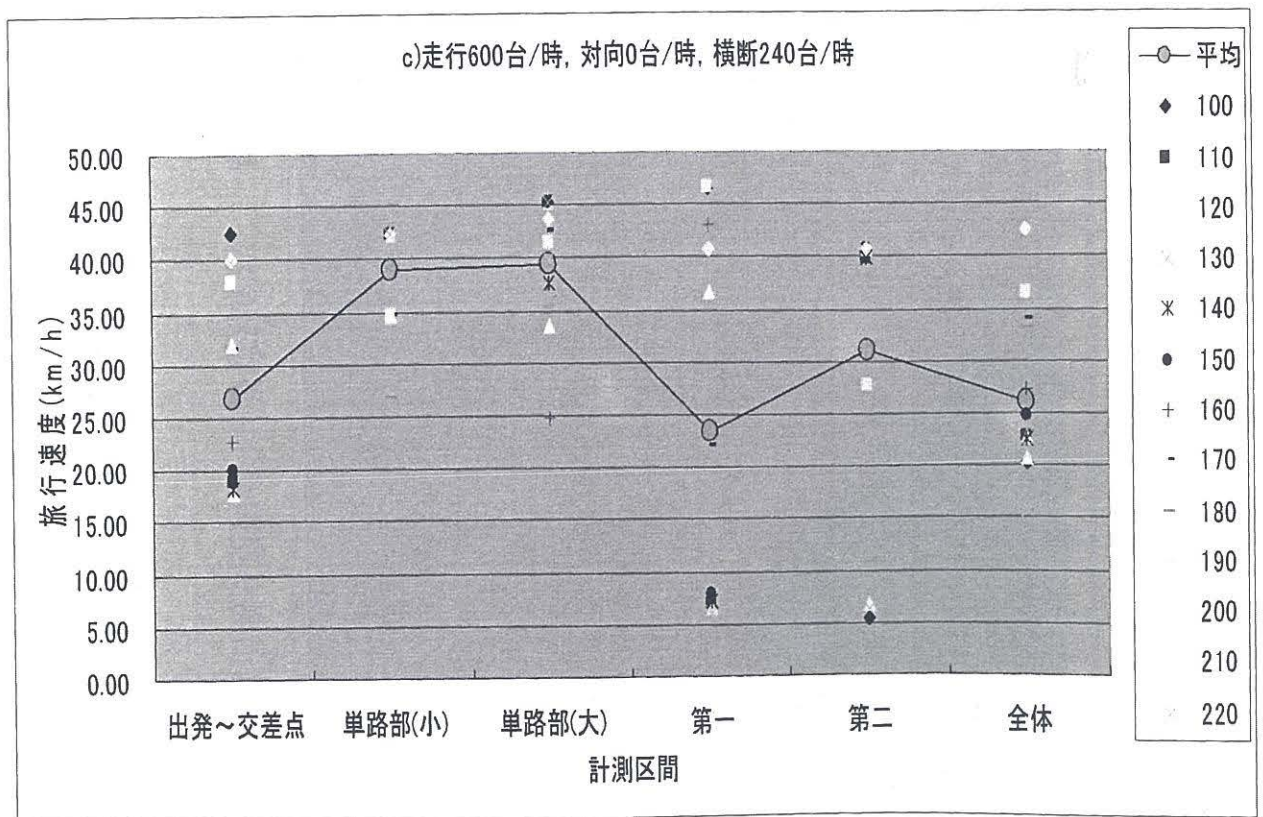


図 3-4-3 (2) シミュレーション結果

3. 5 緊急車両走行性の動的点検・構築支援実践

(1) 緊急車両優先信号制御ネットの構成

緊急車両が中央に生成される空間を利用して走行する2車線道路について、600m 強の区間での走行性シミュレーションを行った。一般車の交通量が、緊急車両の走行性の大きな阻害要因となることは当然で、まず、緊急車両の出動経路は、交通量の時間変動特性を踏まえ、事前に十分に検討しておかなければならない。次に、信号交差点では、警報を発しているにもかかわらず、死角にあることから交差交通に関する不安は大きい。これは交差点手前で信号停車している一般車の退避運転においても、規制力を持つ緊急車両においてもいえることである。3. 4 では、緊急車両から誘導員が降車して、交差交通への規制を確認するという行動系を加えてこの点の組み入れを行った。

この方式では時間ロスが大きいし、誘導員の安全確保にも問題がある。そこで、緊急車両から信号電波を発して、交差点信号を制御する方式を導入する。図3-5-1に、この信号制御系のペトリネットを示す。

下方が緊急車両の進行ネットであり、左上に緊急車両から信号電波の受信と制御ネットを、右上に制御を受ける信号ネットを配置してある。それぞれの部分ネットの挙動を以下に示す。

まず、図3-5-2(1)が、緊急車両からの信号電波の発信と受信処理部のネットである。緊急車両は、交差点手前の適当な地点T1で信号電波を発信し、P5にトークンを出力することで、通常時の制御状態を意味するP6のトークンを消去し、緊急車両の優先モード状態P7にトークンを移す。一方、緊急車両は交差点を通過すると、その信号電波を発信し、P8にトークンが出力されて、T4が発火することで通常時の信号制御に戻ることになる。

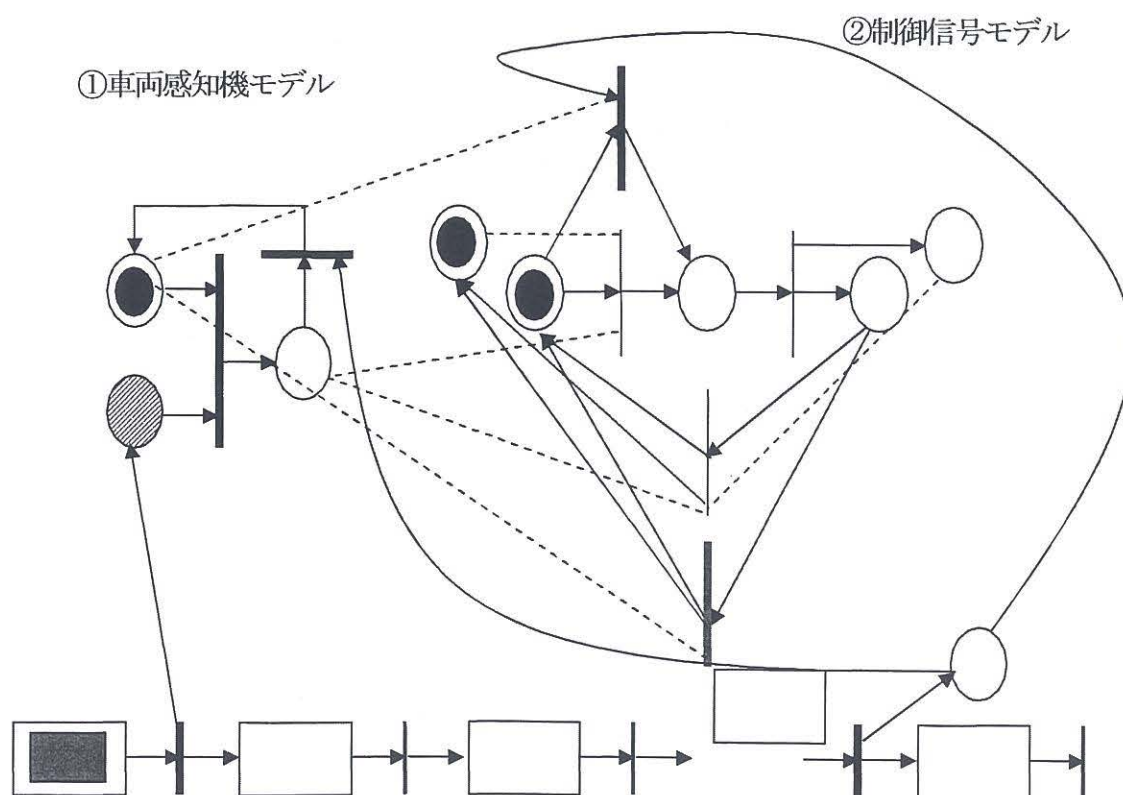


図3-5-1 緊急車両優先制御信号のペトリネット

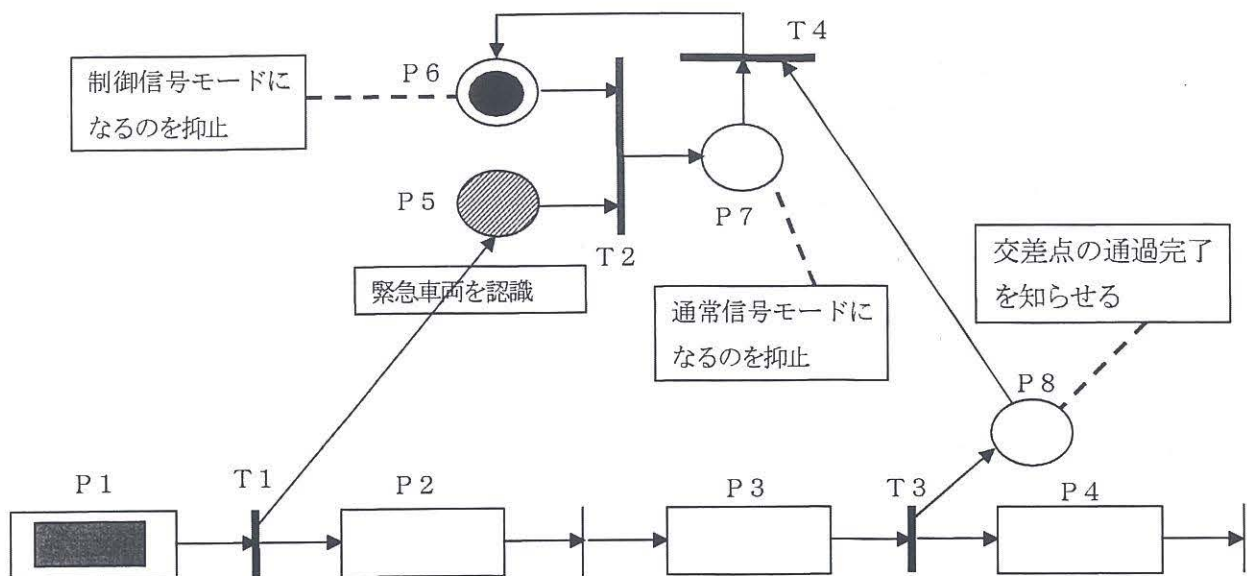


図 3-5-2 (1) 信号送信と受信部のネット

次に、図 3-5-2(2)(3)が、その結果による緊急車両の優先モード状態での信号制御の原理ネットである。まず、図 3-5-2(2)が、交差点信号の全赤への制御ネットである。図 3-5-2(1)で説明したように、緊急車両からの電波を受信し、T2 が発火することにより、P6 のトークンは消滅し、P7 にトークンが出力される。その結果、図 3-5-2(2)では、T1 と T2 が抑止され、T3 の抑止が解除されることになる。信号ネットで述べたように、青現示には、タイマを持つプレースとタイマを持たない表示用のプレースを設けている。T3 への入力プレースを、このタイマを持たない表示用のプレースとすることにより、青現示のタイマ時間を消費することなく、T3 の発火によりトークンは黄現示のプレースに移動し、直ちに黄現示となり、そのタイマ時間の消費後に赤現示に切り替わることになる。

この状態は、緊急車両が交差点を通過するまで継続される。この制御は、緊急車両の交差点通過に伴う電波受信により、P8 にトークンが打たれ、T4 の入力条件が成立することで、トークンが青現示のための 2 つのプレースに出力されるとともに、図 3-5-1 に示すアーク設定によって、図 3-5-2(1)の T4 の発火により、通常時制御モードである P6 にも出力され、維持されることになる。

図 3-5-2(3)は、青現示の維持制御ネットである。ここでは、T3 への入力プレースを、緊急車両の交差点通過に伴う電波受信によりトークンが打たれ P8 としている。このことで、図 3-5-2(2)の全赤制御とは異なり、T3 の発火は直ちには起こらずに、P7 による青現示の切り替えトランジション T1 の抑止が継続し、緊急車両が交差点を通過するまで、青現示が維持されることになる。その後の通常時制御への復帰は、図 3-5-2(2)で説明した原理と同じである。

この 2 つの緊急車両優先制御策は、プレース P8 を、トランジション T4 の入力プレースとするか、あるいはトランジション T3 の入力プレースとするかのみの違いである。ペトリネットでは、このことは Sdata の Tran の項の T3 と T4 の一箇所の変更でシミュレーション実行が可能となる。これらの変更への対応は、この Sdata に適切なコメントを付加し、その検索により容易にかつ確実に行うことができる。以下では、この方式によるシミュレーション実行とその結果の考察を行う。

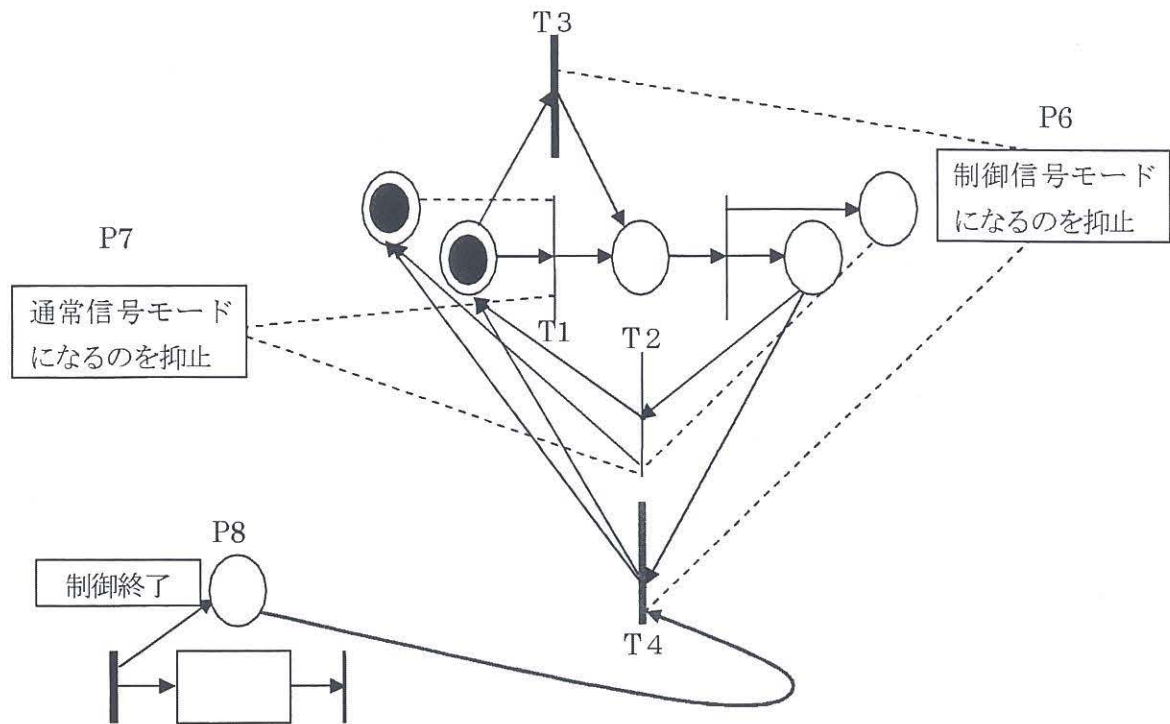


図 3-5-2 (2) 全赤制御の信号ペトリネット

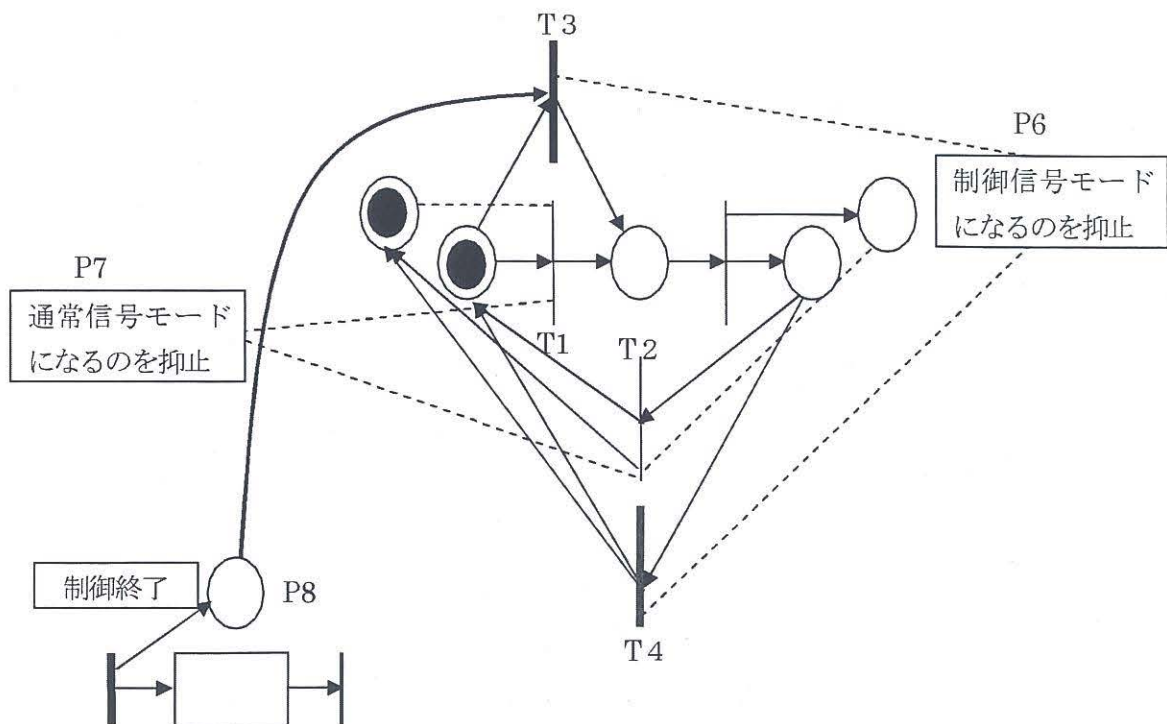


図 3-5-2 (3) 青現示維持制御の信号ペトリネット

(2) 差点内走行支援のシミュレーション実行と考察

3.4 では、2車線道路の600m区間での緊急車両走行のシミュレーションを行った。この区間には2箇所の信号交差点があり、そこでの走行性の低下が課題であるとした。このシミュレーションでは、聞き取り調査の1件にあった誘導員による交差交通の規制確認を組み込み、それに10秒か20秒を要するとしていた。この数値も問題ではあるが、それ以上に緊急時のこのような行動に際しての安全性にも大きな問題があるといえよう。上で提案した信号制御による緊急車両の走行支援システムは、走行性の向上とこの安全性の確保とに有効と考える。ここでは、走行性の向上評価を目的に、3.4と同じ道路区間でのペトリネットシミュレーション実行を行う。

システムネットの構成は、3.4の(1)で使用した図3-4-1のネットとそのSdataとを出発点に、緊急車両の交差点通行部分のネットを組み換える形で行える。具体的には、図3-4-1での誘導員による交差交通の規制部のネットを削除し、図3-5-1に示す緊急車両優先信号制御ネットを結合させることになる。削除は、Sdata上での、Tranの項での入出力関係と、Placeの項での抑止関係の削除とを行うとともに、図3-3-10の点線で囲んだ部分の要素を非表示にすることで行える。このことは、ネット図を要素番号付きで表示させると同時に、Sdataファイルも表示させ、その検索作業によって確実に行える。

追加結合では、図3-5-1で追加に必要な要素、プレースとトランジションを確認し、SdataのPlaceとTranの項で、まず、総数を変更し、それぞれの最後尾に追加し、そのファイルを開き、要素配置のメニューにより追加配置を行うことになる。

シミュレーションの基本パラメータは同じとし、また、計測区間と計測法も同じとして実行する。以下にシミュレーション結果を示す。

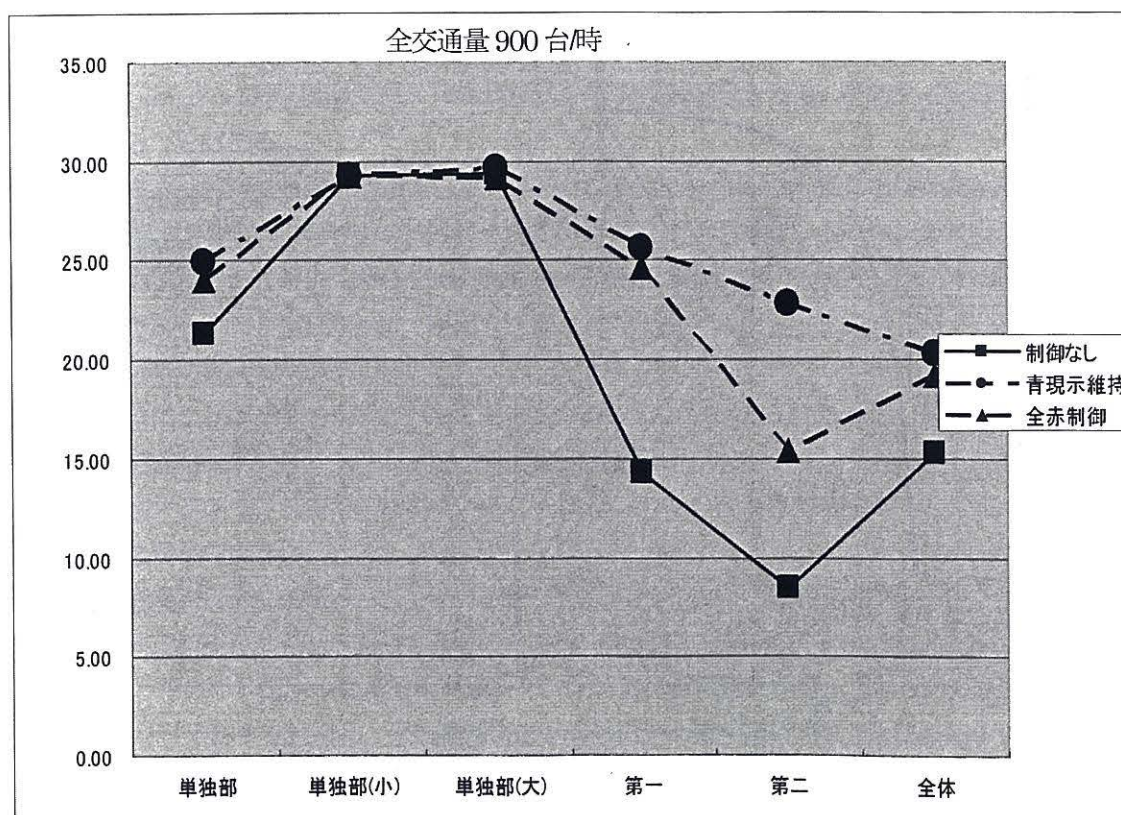


図 3-5-3 (1) 制御効果のシミュレーション結果

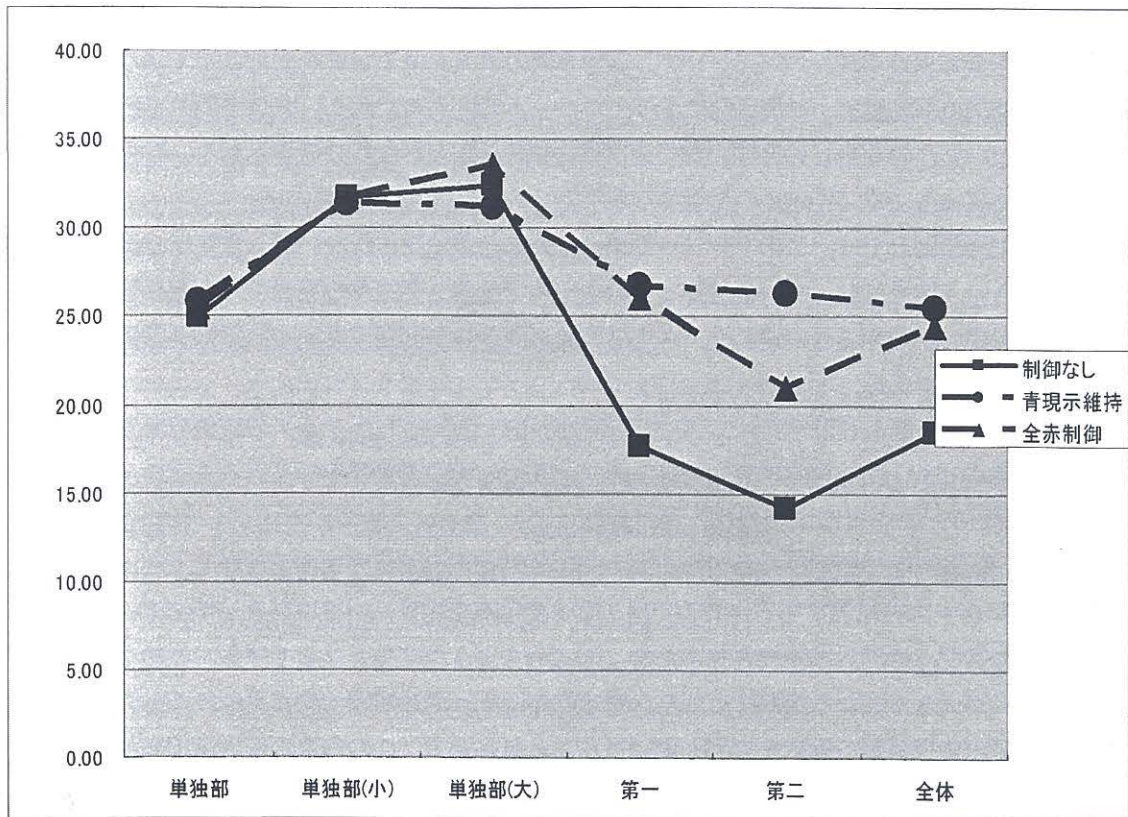


図 10-5-3 (2) 制御効果のシミュレーション結果

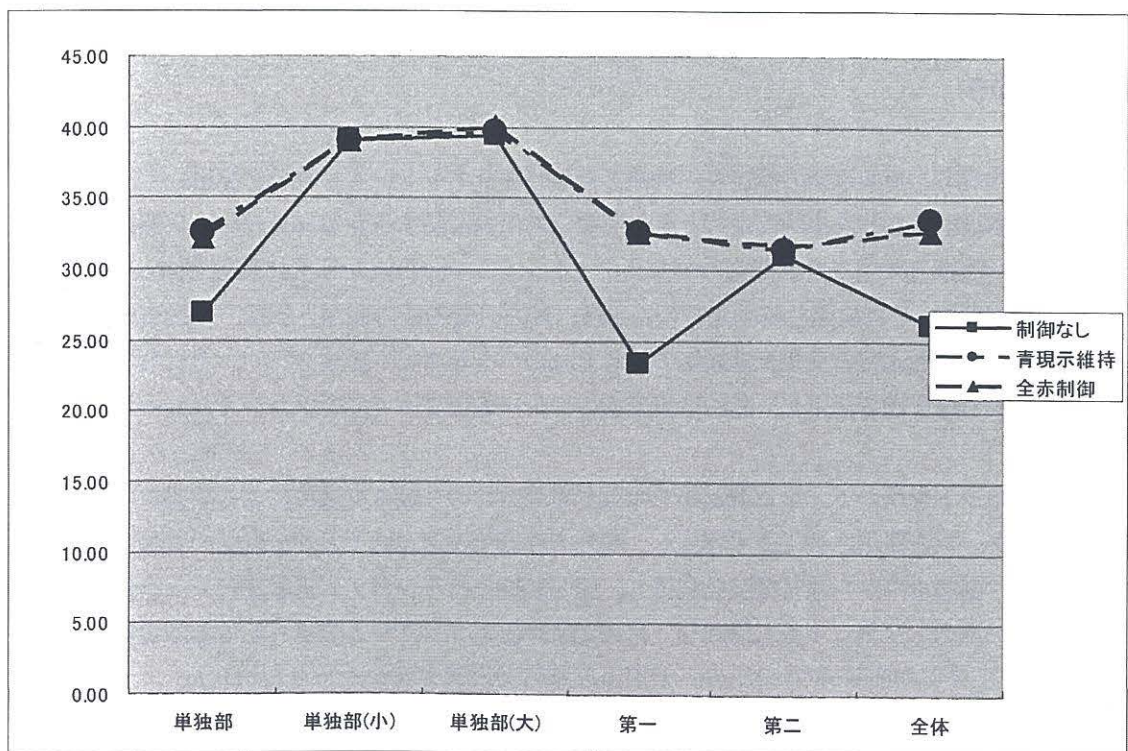


図 10-5-3 (3) 制御効果のシミュレーション結果

図 3-5-3(1)は、全ての交通量、即ち、緊急車両の進行方向流、同対向流、および2交差点での上下方向流の一般車の交通量を全て900台/時とするケースで、緊急車両の進入タイミングを変化させて繰り返し行ったシミュレーション結果の平均値を、計測区間に沿ってプロットしたものである。緊急車両の走行支援のための信号制御を行わないときの600mの区間の旅行速度は、15Km/hとかなりの低速となる。信号制御を行うことで、この値は20Km/hと約5Km/hの改善がみられた。

全赤制御と青維持制御とでは、このトータル効果には大きな差は見られないが、交差点では、青維持制御の効果が大きいという結果になっている。特に、このケースでは第2交差点の通過時に大きな差が見られた。これには、交差点間の距離や信号の連動性、さらに緊急車両から制御電波を出す位置等が関係する。この点での展開が今後の課題である。

図 3-5-3(2)は、主交通量を600台/時に、交差交通量を480台/時にしたケースの結果である。制御なしでは18Km/hであるのに対して、制御時には25Km/hと7Km/hの改善効果がみられる。また、制御方式についても図 3-5-3(1)のケースとほぼ同様のことがいえる。

図 3-5-3(3)は、緊急車両の進行方向流の交通量は600台/時であるが、同対向流はなしとし、交差交通量も240台/時と少ないケースの結果である。ここでは、第1交差点までは、一般車の交通があり、その影響は出るが、それ以降の区間への流入は制約されるため、図に示すような結果となっている。このケースは、時間帯で交通流の方向が大きく変わる道路に当たり、都市内の通勤・退社時間で良く見られるものである。この結果は、緊急車両の走行経路の選択を時間帯別に行うことが必要で、この程度の交通量であれば、一般車交通による阻害があっても30Km/h程度の平均旅行速度が確保できる経路と推測され、緊急路の選定の目安になりそうである。

3. 6 あとがき

本章では、空間対応と事象連鎖の記述性に特徴があるペトリネットシミュレータを用いて、実データからの展開に種々の障害がある緊急車両の走行とその支援システムに関するシミュレーション開発を行った。著者らは、既に、一般車・大型車の混在流のペトリネットシミュレーション研究に実績を持っており、緊急車両を大型車と読み替え、それに緊急車両走行の特殊性、即ち、警報音の発信と伝播、一般車の退避運転による路肩停車、交差点内通過時の交差交通規制のそれぞれのペトリネット記述を行い、それらをペトリネットの最大の魅力である結合性を活用し、動的構築支援のフレームに従って、ミクロシミュレーションネットの構成を行った。

このシステムネットを用いて、2車線道路での緊急車両走行の一般車交通流による阻害シミュレーションを、交通量のパターンを変化させてまず実施し、交差点通過時の速度低下と安全確保の課題を提示した。この課題に対して、緊急車両から信号電波を発信し、信号制御を行うシステム提案を行い、全赤制御と青現示維持制御のシステムペトリネットをも構成し、その効果評価もプログラム変更なしで即時実行可能となることを示すとともに、平均旅行速度で5Km/h～10Km/h程度の改善が可能なことを示した。

全赤制御と青現示維持制御のどちらが望ましいかについては、より交差点部ネットの精緻化と交通流との関連でさらに検討する必要があるだろう。

3. 7 参考文献

- 1) 木俣昇, 高木秀彰, 黒川浩嗣: ペトリネットによる交通流シミュレーションシステムの開発, 土木計画学研究・論文集, No.12, 691-699, 1995.
- 2) 木俣昇, 鷲見育男: 消防防災システムの阻害要因のペトリネットシミュレーションに関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No.14, 393-400, 1997.
- 3) 木俣昇, 西村武敏, 四藤一成: バス交通流シミュレーションへのペトリネットシミュレータの適用化研究, 土木計画学研究・論文集, No.19, 793-802, 2002.
- 4) 木俣昇, 中村彰彦: 交通流ペトリネットシミュレータにおける背景画像上でのデータベース化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, 51-62, 2004.
- 5) 木俣昇, 曾根岳志: ペトリネットによる背景画像上での建物避難シナリオのシミュレーション研究, 土木計画学研究 土木計画学研究・論文集, Vol.22, 2005.10, 53-64
- 6) 堀浩三, 木俣昇: 背景画像上での地震時緊急車両走行のペトリネットシミュレーション開発, 土木計画学研究・講演集, 30 巻(CD-ROM 版) No.317, 2004.11.
- 7) 堀浩三, 木俣昇: ペトリネットシミュレータによる背景画像上での地震時緊急路の点検・構築支援システム, 土木計画学研究・講演集, 32 巻(CD-ROM 版) No.40, 2005.12.

第4章 地震時消防防災システムの動的点検・構築の支援研究

4. 1 まえがき

木造市街地を抱えるわが国においては、地震時応急対応計画の柱は、市街地火災の延焼阻止を目的とする消防防災計画であるといえよう。第3章では、その一部をなす緊急車両の現場への走行性の点検を目的に、第2章で述べたペトリネットシミュレーション法を活用し、緊急車両の市街地走行に際しての一般車交通による阻害性シミュレーションに関するマイクロペトリネットを構築し、単路部と交差点部での阻害度を、交通量・一般車の退避運転性・交差点部での安全確保法等との関連で検討した。

本章では、このマイクロペトリネットをサブシステムとし、火災通報から始まり、出動指令の発令を経て、経路を走行し、火災現場に到着するまでの消防防災システムのプロセス全体を対象とし、その地震時点検・構築支援を目的に開発研究を試みる。図4-1-1と図4-1-2に、その全体概念図と開発手順を示す。

まず、4.2 では、この全体図に沿って、基本部分システムの準備を行う。即ち、1) 火災通報を受けて、確認・出動指令を出す<司令部>のシステムペトリネット、2) 基地での待機から出動指令を受け、緊急路を現場へと走行する<緊急車両走行部>のマクロペトリネット、そして、3) 地震時に発生する<走行阻害部>のシステムネットを準備する。また、消防防災システムの目的とする市街地火災の延焼阻止との関連での評価・点検のサブシステムとして、著者等によって開発されてきた火災延焼シミュレーションシステムについても、その概説を行う。

4.3 では、実行性の担保には、通常時消防防災システムを基礎に、地震時消防防災システムの点検・構築を進める必要があるとして、通常時消防防災システムのペトリネットを、4.2 の準備ネットを用いて、第2章で述べた点検・構築支援フレームに沿って、対象地域の背景画像上で構築・構成して行く。図4-1-2の中

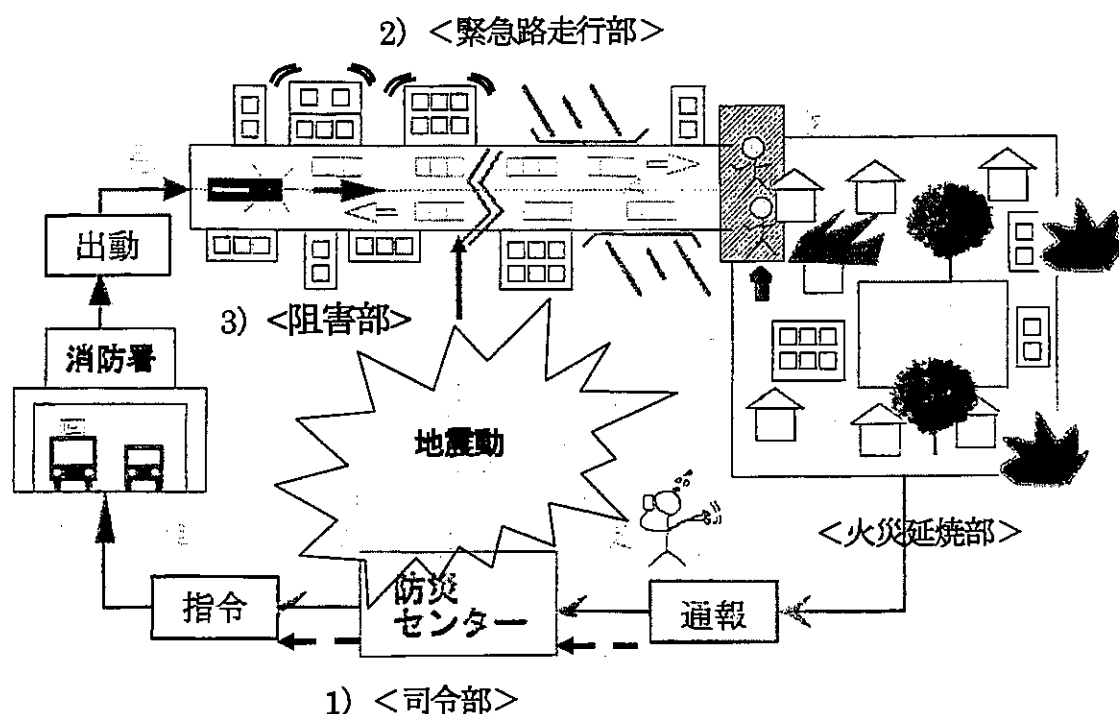


図4-1-1 地震時消防防災システムの機動環境

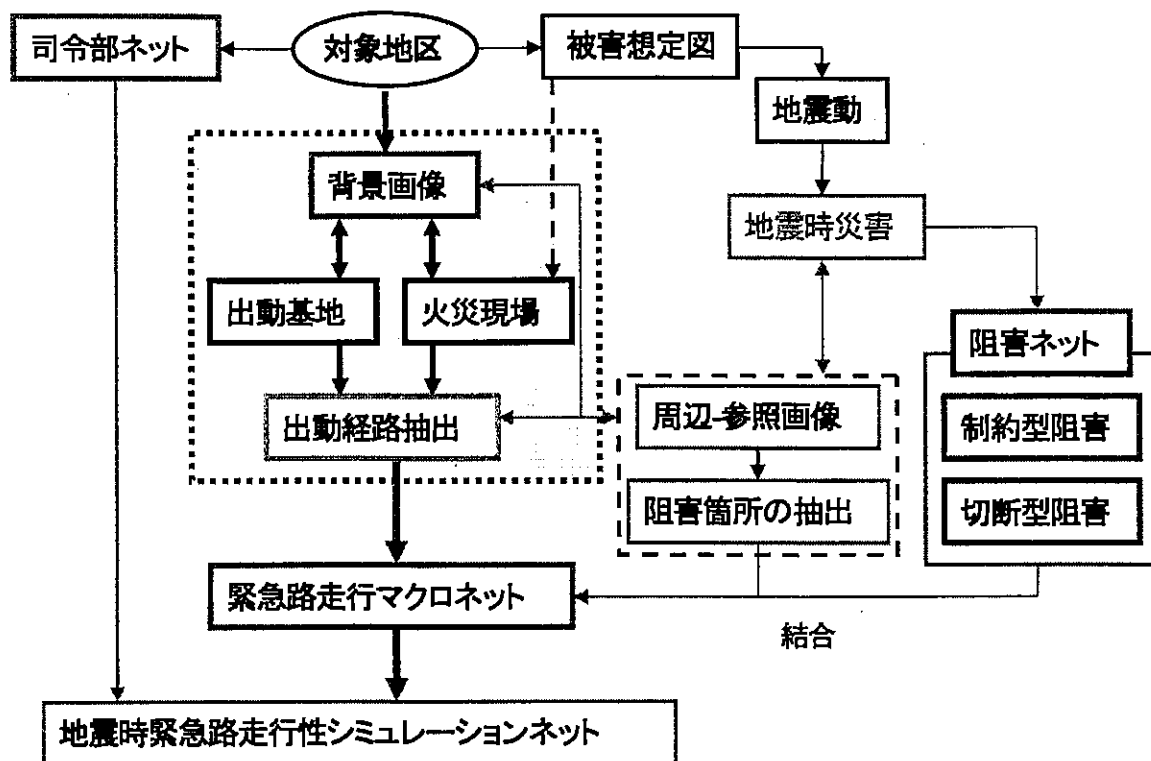


図 4-1-2 地震時緊急路走行性シミュレーションネットの構成手順

心部のフローがそれに当たる。ここで構築される緊急車両走行のペトリネットは、広域での点検・構築支援を目的としており、マクロとなるために、そこにおける一般車交通による阻害部のパラメータ設定には、第 3 章で開発した緊急車両走行のマイクロペトリネットによるシミュレーション結果を用いることとし、通常時に選択される経路の妥当性をまず点検しておく。

そして、4.4 において、この通常時消防防災システムのペトリネットを基に、図 4-1-2 の右側に示す手順で、地震時阻害ネットを結合化して行き、地震時消防防災システムのペトリネットへと展開構築して行く。特に、地震時阻害では緊急路の切断が発生するために、引き返しと迂回路をも追加し、点検・評価のシミュレーションを行う。そして、地震時阻害の切断性と地震時火災の多発性特性を考えると、通常時の即時出動性重視から戦略的出動へ転換する司令部ネットへの再構成が必要となることから、この点検・構築支援についてもシミュレーション実行を試みる。

4. 2 消防防災システムの点検・構築支援のための基本システム準備

(1) 消防防災システムの基本部分ペトリネット

図 4-1-1 に示したように、消防防災システムの取り扱いには、＜司令部＞の出動指令による＜緊急車両走行部＞の記述と、現場の＜火災延焼部＞の記述とが必要となる。ここでは、この前半部のペトリネット記述に必要な基本部分を、＜司令部＞＜緊急車両走行部＞＜阻害部＞に分けて概説する。

まず、図 4-2-1(1)に、司令部システムの概念図を示す。上述したように、通報者による火災情報の“通報”がなされ、それを受けた司令部において、まず、出動基地に“予告指令”が出される。出動基地ではそれを受けて“出動準備”の状態に入る。これと平行して司令部では情報の“確認作業”がなされ、その後に“本

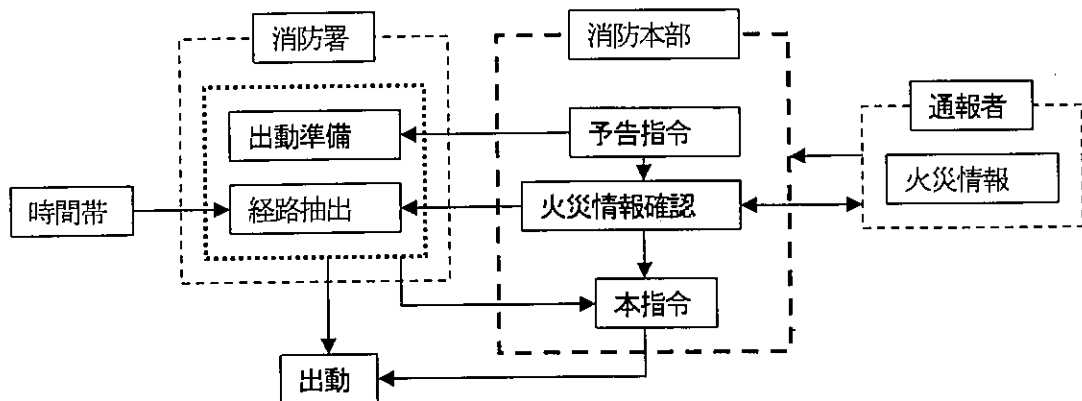


図 4-2-1 (1) 司令部システムの概念図

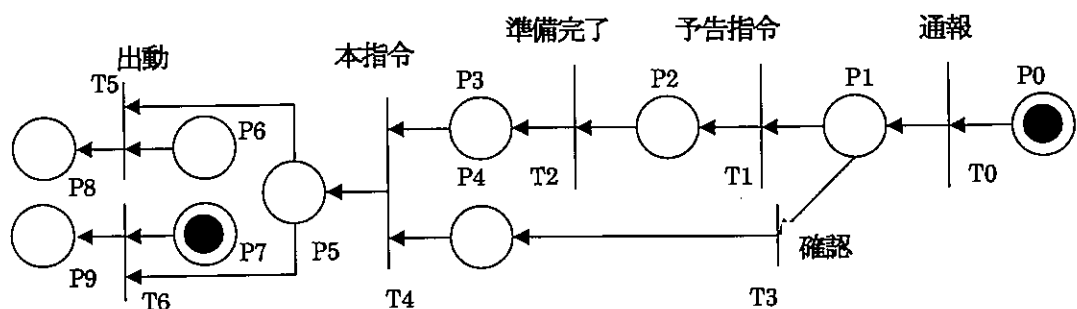


図 4-2-1 (2) 司令部システムネット

指令”が発令されることになる。緊急車両は、この指令を受けて出動する。

図 4-2-1(2)は、この概念図を、第 2 章で述べたペトリネットによる事象連鎖と状態推移の記述法によって、トランジションとプレースと入出力アークを定め、ネット表示化したものである。プレース P0 上のトークンは、通報者による通報状態を意味している。この状態から本指令の発令までの状態推移は、各プレースに想定するプレースタイマと、第 2 章で述べたトランジションの発火則によって行われることになる。緊急車両の出動は、図 4-2-1(1)の概念図にあるように、時間帯によって経路を変えてなされる。図 4-2-1 (2) のネットでは、P6 (昼) と P7 (夜) のプレースを設け、時間帯にトークンを初期配置して置くことで、T5 あるいは T6 を発火させることで経路を選択して出動するネット構成となっている。

次に、緊急車両の走行部のペトリネットを図 4-2-2 に示す。まず、図 4-2-2(1)は、ここでのモデル化が第 3 章の緊急車両走行のマイクロネットとは異なり、マクロネットとしていることを示すものである。即ち、マイクロネットは、この道路図の閉塞区間図に対応する形での記述であったのに対して、マクロネットでは、単路部区間と交差点部区間に対応する形の記述となる。図 4-2-2(2)は、このときの一般車交通による緊急車両走行への障害の組み入れ法を示したものである。即ち、T1 あるいは T6 を生成トランジションとし、その出力カラーに応じて、選択トランジション T2 あるいは T7 によって、P4 か P5 あるいは P8～P10 に出力させて、それから緊急車両進行のトランジション T5 あるいは T11 に抑止を掛けて、設定されたタイマ時間分の走行遅延を行うというものである。

これらのタイマは、交通量や信号現時状態によって異なる。このことは、第 3 章で開発・展開を行ったミクロシミュレーションネットによる検討によっても明白である。図 4-2-2(2)のマクロネットでは、単路部では、同じ交通量でも 2 種類のタイマを用意し、交差点部ではそれを 2 種類とし、それらの値は、第 3 章のマイクロネットによるシミュレーション結果より設定することで、広域での点検性と交通流の反映性の両要請に

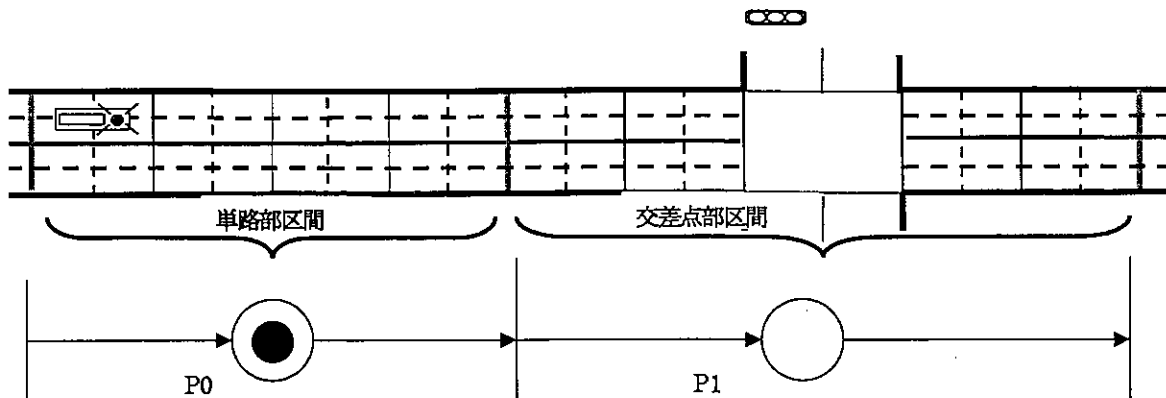


図 4-2-2 (1) 緊急車両走行のマクロ表現

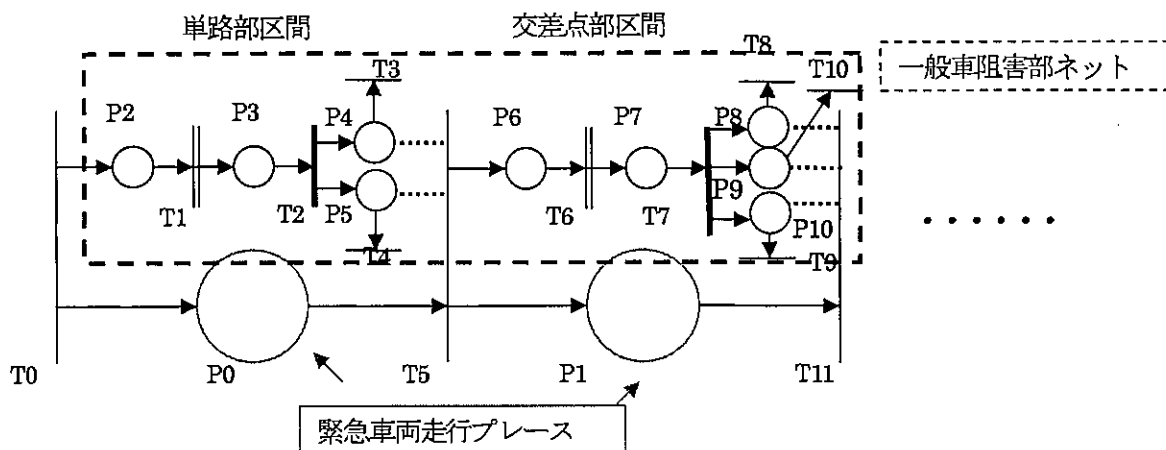


図 4-2-2 (2) 緊急車両走行の一般車阻害マクロネット

応える工夫を可能にしておく。この具体的な設定法は、4.3 での通常時消防防災システムの点検評価のシミュレーション実行時に述べる。

最後に、地震時に発生する緊急車両の走行阻害に関する記述ネットについて概説する。緊急車両の走行阻害には、走行性が低下する緊急路制約型と、走行が出来なくなる切断型とが考えられるだろう。図 4-2-3(1)は、緊急路沿道建造物の倒壊はみ出し等による前者のケースで、緊急車両の徐行を伴う緊急路制約型のペトリネット記述である。ここでも生成・選択トランジションによる確率阻害事象としている。p8 に設定されるタイマ時間分の走行遅延が生じるネットである。具体的には、緊急車両が t0 を発火させて、この阻害区間に入ると同時に、p7 にもトークンが打たれて、阻害が発生していれば、p8 にトークンが進み、抑止アークが働き、ここに設定されたタイマ時間の間は t2 の発火が抑止される。この時間分が経過すると、t5 が発火し、このトークンは消えて、t2 の抑止が外れ、緊急車両は空間制約された緊急路を抜けることになる。それと同時に、トークンは阻害有りの p5 に戻され、制約型阻害の状況は、依然として継続されているというネットになっている。

図 4-2-3(2)は、沿道建造物の倒壊により緊急路が完全に塞がれる切断型阻害のペトリネット記述である。ほぼ制約型のネットと同じであるが、緊急車両の進行トランジションを抑止しているプレース上のトークンの処理法に違いがある。制約型阻害ネットでは、このプレースにタイマを設定し、その消費との関係でトークンの消滅・抑止解除が制御されていたが、切断型阻害ではタイマの設定を行わずに、何らかの解除行為がなされない限り阻害が継続するという記述法となっている。即ち、図 4-2-3(2)の点線で囲んだ部分がそれで、

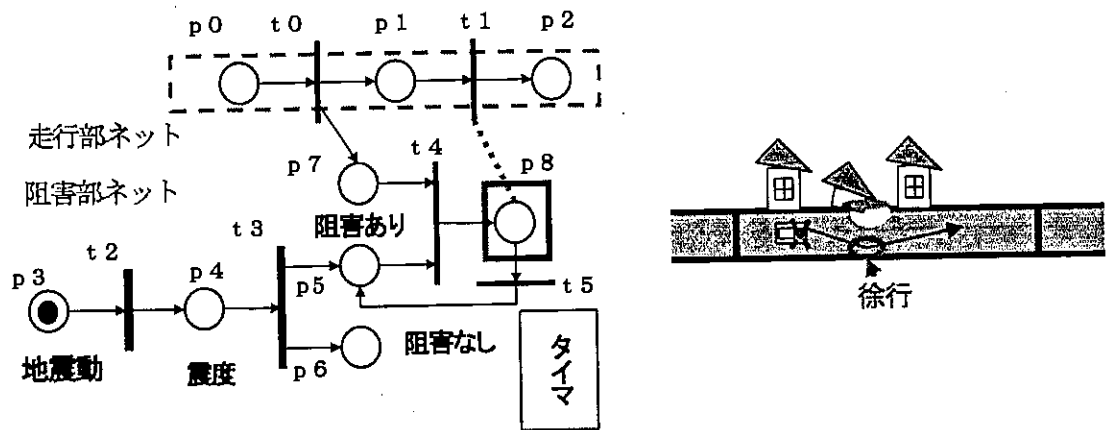


図 4-2-3 (1) 制約型障害のペトリネット

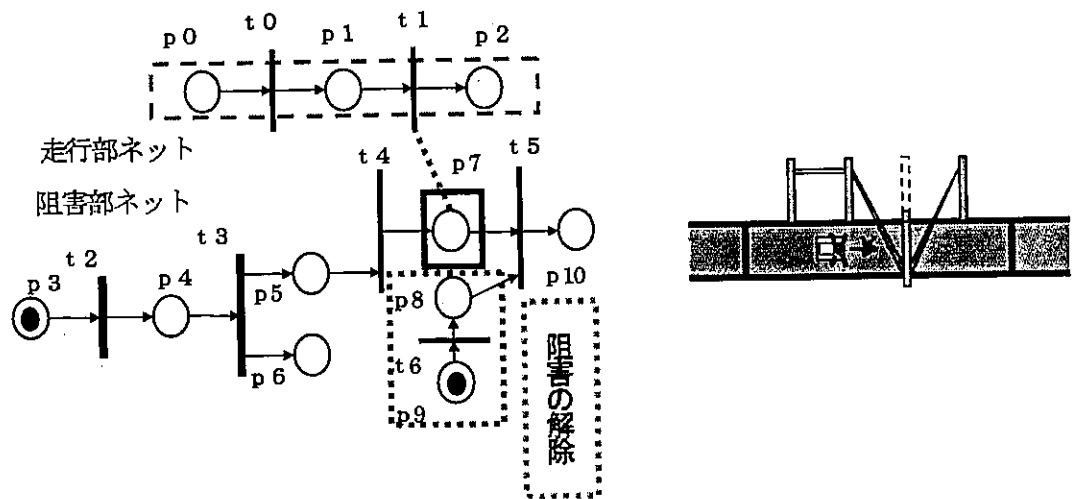


図 4-2-3 (2) 切断型障害のペトリネット

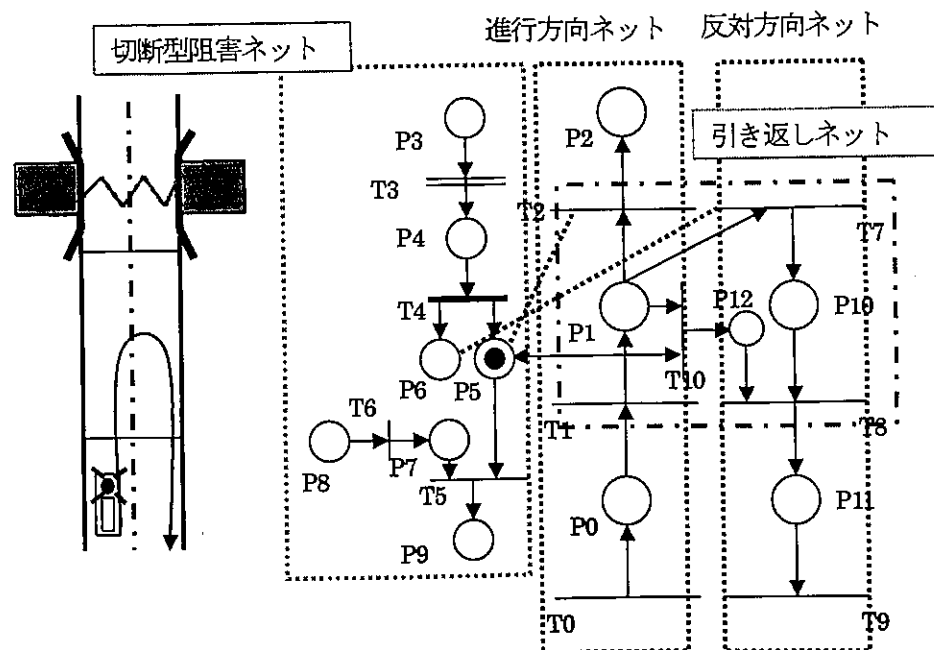


図 4-2-3 (3) 切断障害による引き返しペトリネット

p9 にトークンを打ち、p9 にトークンが進み、解除に必要な作業時間が経過した後に、抑止ブレース p7 のトークンは消滅することになる。

このように、図 4-2-3(2)のネットを使用すれば、切断型阻害が発生すれば、緊急車両は解除作業が完了するまでは立ち往生状態になる。図 4-2-3(3)は、現実的には、そのような場合には、緊急車両は引き返しをするとして、その走行を組み込んだネットである。現場に向かっての進行の走行ネットと、その逆の反対方向の走行ネットを用意し、上述の切断型阻害ネットとの関連で両者の結合化を行ったネットとなっている。

切断型阻害ネットで、網掛けのあるブレースは非阻害状態を表し、トークンの配置されているブレースが切断型阻害の発生状態を表す。そして、発生状態からは緊急車両の進行トランジション T2 に抑止アークが設けられていることは上で述べてある。緊急車両の引き返しは、切断型阻害の発生状態で反対方向の進行トランジション T7 を発火させ、P10 にトークンを打つ形で記述される。網掛けブレースから T7 への抑止は、非阻害時には引き返しが必要ないように制御するためのものである。また、この引き返し時の方向転換に伴う遅延は、トランジション T10 の追加と、その出力先の P12 へのタイマ設定によって記述されている。

(2) 市街地火災延焼シミュレーションシステムの概説

消防防災システムの点検は、火災延焼の推移との関連でなされる必要がある。そのために、ここでは、著等が開発し、実火災との検証を進めてきた市街地火災の延焼シミュレーションシステムを援用することとし、その概要を述べておく。

図 4-2-4(1)が、火災延焼シミュレーションシステムの構成概要である。対象地域画像から①～③までの 3 つのデータファイルを作成し、実行プログラムによる火災延焼シミュレーションを行う。延焼計算の基本形は、延焼速度式のメッシュ化による市街地シミュレーションであり、酒田大火や福光大火に対する検証を行い、風横方向には若干過大延焼となるが、風下と風上方向では良好な結果が得られている。

ここで援用するシステムは、その出力結果を建物に対応させて、出力形状もそれと対応したポリゴン形式を使用するものである。図 4-2-4(2)が、これらの計算と出力変換に必要な 3 つのデータファイルの概要であり、いずれも対象地域の地図画像をベースにして作成されるものである。

図 4-2-4(2)の左上の画面が対象地域の住宅地図画像である。この画像上で建物を識別し、まず、建物番号を付けて登録する。そして、各建物の形態データファイルを「建物形態の辺の数」「ポリゴン座標」「建物属性」を要素として作成する。建物属性とは、木造・防火木造・耐火造の区別である。次に、左下の画面のように背景画像上にメッシュを掛ける。メッシュ長は 10～15m 程度である。そして、それぞれのメッシュにおいて、木造・防火木造建物の面積を求める。これがメッシュの属性を決めるメッシュ属性データで、メッシュの可燃・非可燃・空地等の判定と、火災延焼速度の特定化は、このデータを参照する形で行われる。

メッシュ対応建物データは、メッシュ上での延焼シミュレーション結果を具体的な建物の炎上に結びつけるもので、その対応関係で出力画面を作画していくのが、ここで援用する火災延焼シミュレーションシステムである。

地震火災の組み入れでは、地震時火災の同時多発性と、地震発生時の気象条件による延焼動態の変化性がポイントとなる。図 4-2-5(1)と(2)は、本シミュレーションシステムによる火災延焼シミュレーションの実行画面例である。気象条件の変化と市街地の構造によって、火災の延焼動向が変化することが分かる。なお、このシミュレーションでは、その性格上、炎上状態からのスタートとなり、この推移図に示している時刻は、出火からではなく炎上状態からの経過時間である。地震時消防防災システムの点検では、このオーダーのシミュレーションでも十分に役立つが、通常時のシステムの点検では、この点を考慮して活用しなければならない。

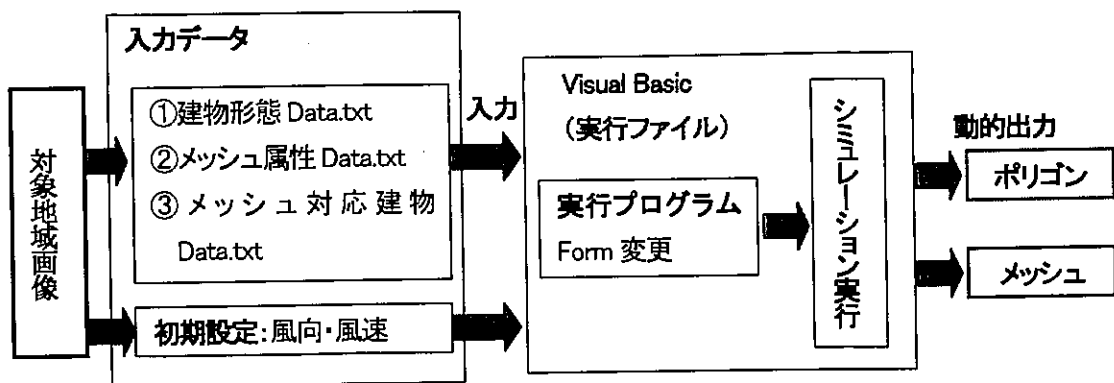


図 4-2-4(1) 火災延焼シミュレーションシステムの概要

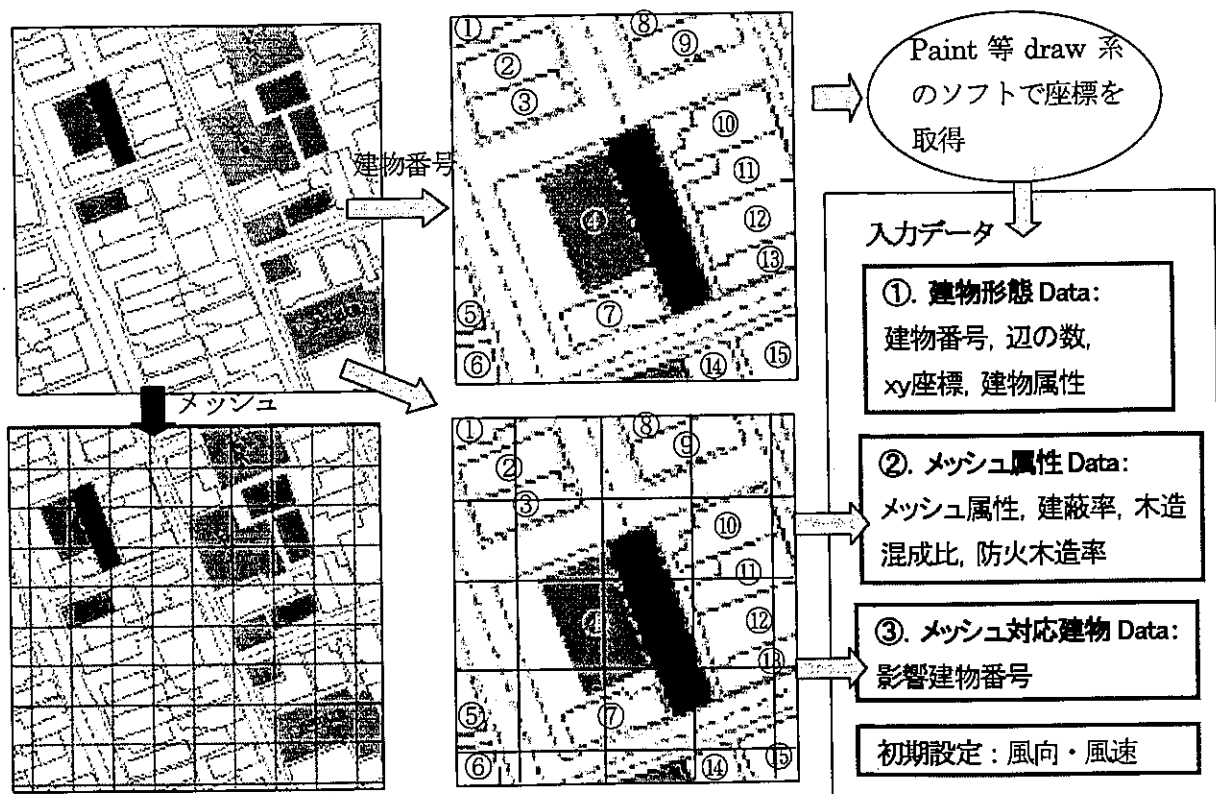


図 4-2-4(2) 火災延焼シミュレーションシステムの概要



図 4-2-5(1) 延焼シミュレーション実行画面(冬の夜 風向=南東 風速=5.0m/s 地点①)



図 4-2-5(2) 延焼シミュレーション実行画面(冬の昼 風向=北西 風速=6.0m/s)

4. 3 通常時消防防災システムの動的点検支援実践

(1) 背景画像上での通常時消防防災システムネットの構築

地震時消防防災システムは、通常時消防防災システムを基盤とすることで、その実行性を担保することが可能となるとし、図 4-1-2 で、本章でのシステムネットの構築手順を示した。図 4-3-1(1)は、その中核部の通常時消防防災システムのペトリネット構成手順を抽出したものであり、これに沿って、以下システムネットの構築実践を説明して行く。

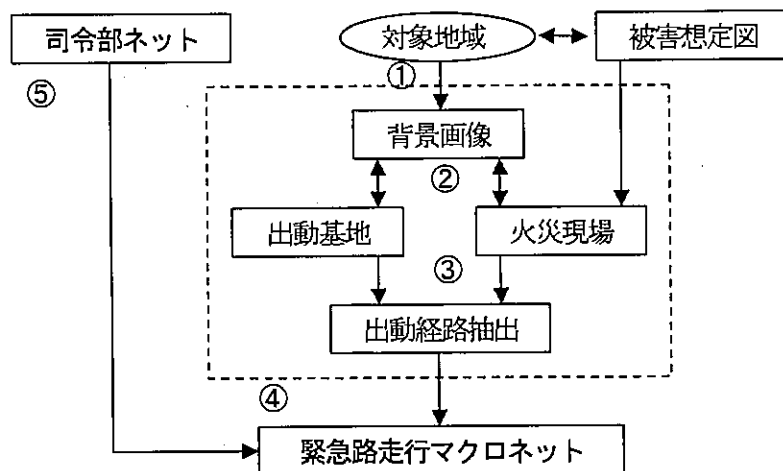


図 4-3-1 (1) 通常時緊急路の走行性ネットの構成手順

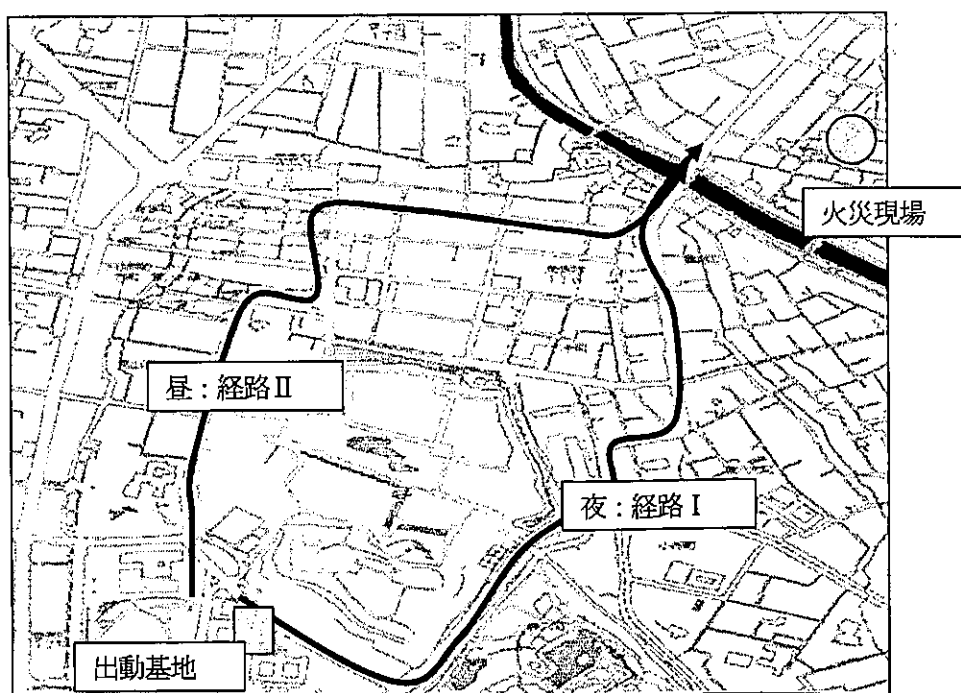


図 4-3-1 (2) 背景画像上での基本要素の抽出

図 4-3-1(2)は、この手順の①の対象地域の背景画像の導入から、その上での②の特定化を経て、③の緊急車両の出動経路の抽出までを示したものである。この想定火災現場は、金沢市の地震防災計画書の被害想定図で、炎上火災数も延焼火災数も3以上とされる地域である。出動経路については、4.2 の(1)の<司令部>のペトリネットモデル化に際しても述べたように、一般車交通による走行阻害を考慮して準備されるとし、聞き取り調査より夜間用(経路Ⅰ)と昼間用(経路Ⅱ)を抽出している。この2経路は、背景画像から分かるように、現場手前で共に同じ橋梁を通過するものとなっている。

通常時消防防災システムのペトリネットは、まず、図 4-3-2(1)に示すように、抽出した経路上に緊急車両の走行部ネットを構築することから始まる。この作業の基となるのが、4.2 の(1)で準備した図 4-2-2 の(1)と(2)である。即ち、背景画像上で経路を抽出・特定化することによって、図 4-2-2 の(1)の単路部と交差点部のマクロプレースとトランジションの配置数を決定し、初期 Sdata ファイルを作成する。そして、そのファイルを開き、第2章で述べたペトリネットシミュレータのメニュー:「要素配置」の画面により、図 4-3-2(1)のように構築していけばよい。

マクロプレースの配置位置は、基本的には、図 4-2-2 の(1)に示されているように、交差点部とその中間である。この単路部区間の距離は、電子地図を背景画像とすることで容易に求められ、プレースタイマ設定が可能となる。この点については(2)で述べる。

緊急車両走行部のネットには、図 4-2-2(2)に示すように、これに一般車による阻害部分のネットが加わる。図 4-3-2(2)は、この追加構築の手順を示している。即ち、初期 Sdata ファイルを開き、例えば、単路部での一般車阻害部の追加であれば、図 4-2-2(2)の単路部区間のネットより、プレースを4個、トランジションを4本追加し、その中、選択先の2つのプレースについては、出力トークンカラーの指定と、抑止トランジション番号の指定を行い、トランジションについても、1本は生成トランジション、1本は選択トランジションとして特定化する形で、拡張 Sdata ファイルを作成する。そして、この拡張 Sdata ファイルを開き、ネットの追加・配置作業を続けていくことになる。

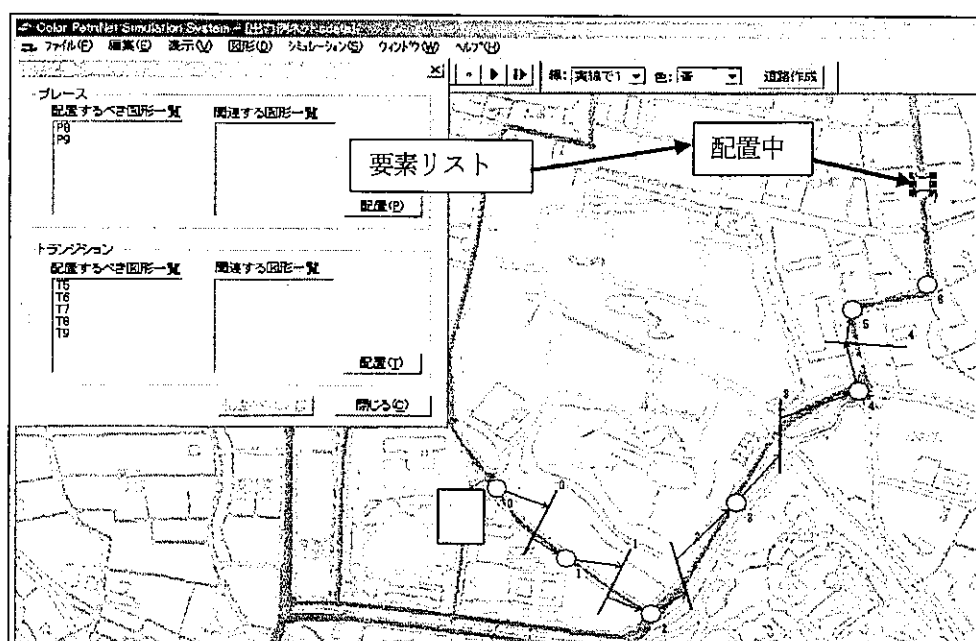


図 4-3-2 (1) 背景画像上での緊急車両走行プレースの配置

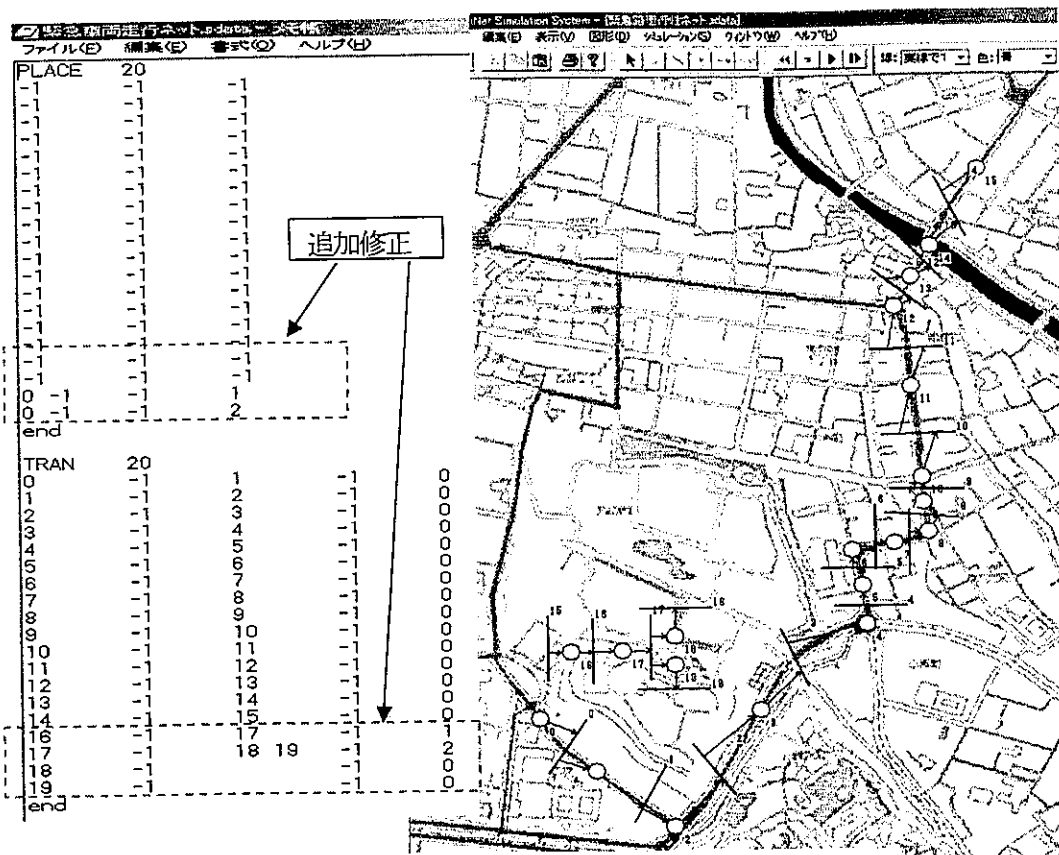


図 4-3-2 (2) 一般車阻害部ネットの追加・配置

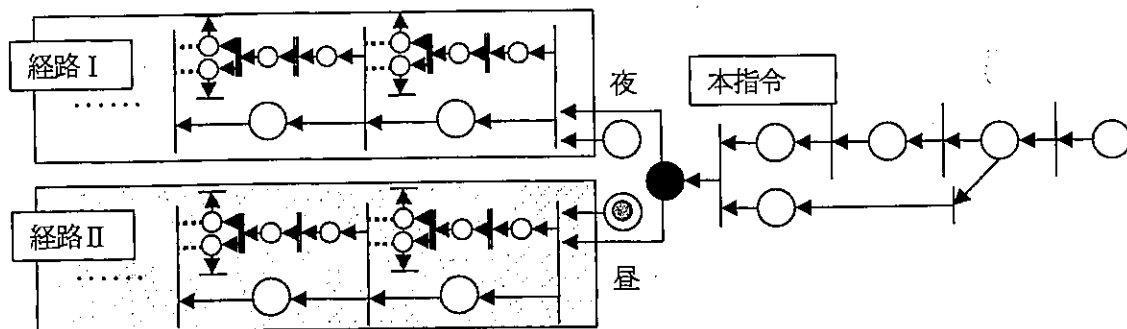


図 4-3-3 (1) 走行部ネットと司令部ネットの結合法

最後は、＜司令部＞のシステムネットの結合化である。図 4-3-3(1)は、図 4-2-1(2)で用意した＜司令部＞のシステムネットと、上の作業で構築してきた経路 I と経路 II の走行部ネットとの結合法を示したものである。司令部ネットで、出動経路は交通障害を考慮して時間帯別に想定されるとした。それを受ける形で、経路の抽出も図 4-3-1(2)に示すように、夜間用は経路 I、昼間用は経路 II とした。図 4-3-3(1)は、この指令形式は、緊急車両の出発トランジションの入力ブレースを、出動指令状態と時間帯の指定の 2 ブレースとすることで記述できるとするものである。図 4-3-3(2)は、この方式で司令部のネットの結合化を行ったものであり、これが点検構築支援の出発点となる通常時消防防災システムのシミュレーションシステムネットとなる。

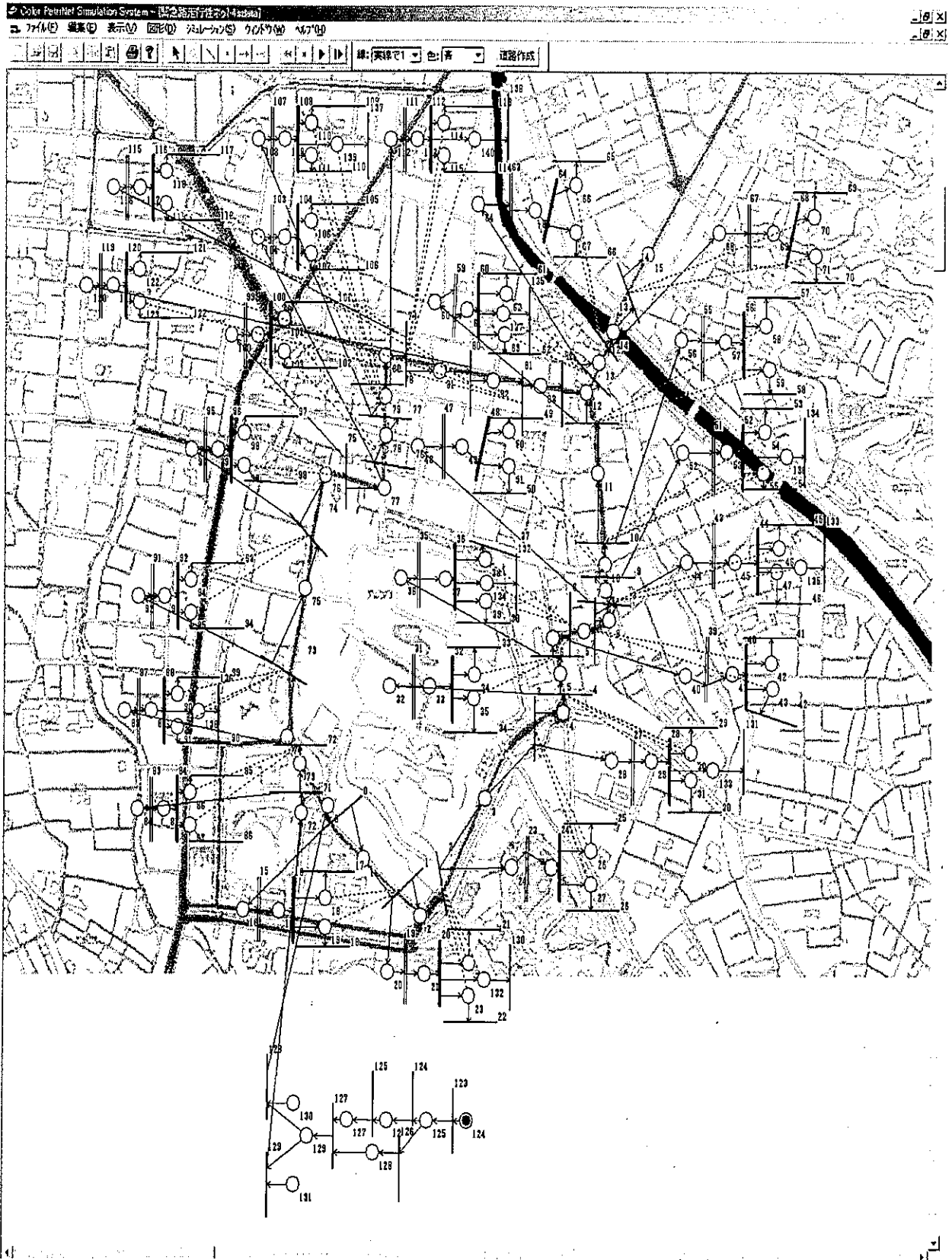


図 4-3-3 (2) 背景画像上での通常時緊急路走行のシミュレーションネット

第2章で強調したように、ペトリネットによるシミュレーション形式は、トランジションの発火則の共通性とネットの共通構造的性による結合可能性を基盤に、対象系をネット記述する工夫のみで、プログラムの変更を行うことなく、直ちにシミュレーション実行が可能となる点に魅力がある。即ち、ここで段階的に構築したネットは、そのいずれの段階でも動的シミュレーションが即時に実行でき、修正・拡張・精緻化による再検討も可能となる。この点の活用は、4.4で具体的に実践する。

(2) シミュレーション実行による通常時消防防災システムの出動経路点検

図4-3-3で構築した通常時消防防災システムのマクロペトリネットを使用して、緊急車両の通常時2経路の走行性点検シミュレーションを行う。

まず、一般車交通による障害部のパラメータ設定を、第3章で開発した緊急車両走行のマイクロペトリネットを用いて行う。このマイクロネットでは、図4-3-4に示すように、緊急車両の進行方向の交通量(a)と対向方向の交通量(b)、および交差交通量(c)(d)の想定の下で、緊急車両の警報認知により一般車が路肩退避し、緊急車両は、退避運転により生成された中央空間を利用して走行するとしている。

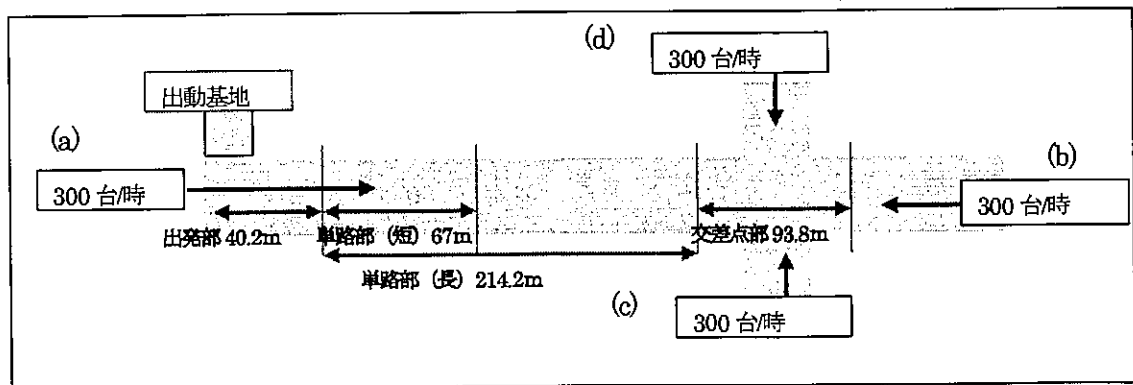
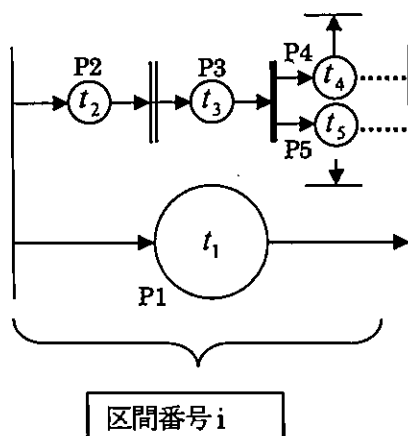


図 4-3-4 交通量の設定と緊急車両の旅行速度計測区間



区間番号 プレイス 番号	i	区間長	l_i
1	t_1^k	l_i/V	
2	t_2^k	-1	
3	t_3^k	-1	
4	t_4^k	l_i/m^k	
5	t_5^k	$l_i/(m^k - \sigma^k)$	

図 4-3-5 (1) 単路部での一般車障害パラメータの設定法

ここでは、抽出経路については、これらの交通量は全て同一とし、平均 300 台/時と 600 台/時の 2 ケースで、乱数初期値を変えた繰り返しシミュレーションを実施し、比較的長い単路部区間と短い単路部区間、および交差点部区間の緊急車両の走行速度統計を作成し、それらの値を用いて、マクロネットにおける一般車阻害部のプレースタイマの設定を行う。

図 4-3-5(1)に、単路部での阻害ネットとその各プレースのタイマ設定法を示す。まず、変数の定義は、

i : プレースの配置区間番号

k : 想定時間交通量のケース番号, $k=1$ のとき 600 台, $k=2$ のとき 300 台

l_i : 単路部区間番号 i の区間長, 背景画像上で計測可能

V : 緊急車両の制限速度

t_j^k : 交通量想定 k でのプレース番号 j のプレースタイマ

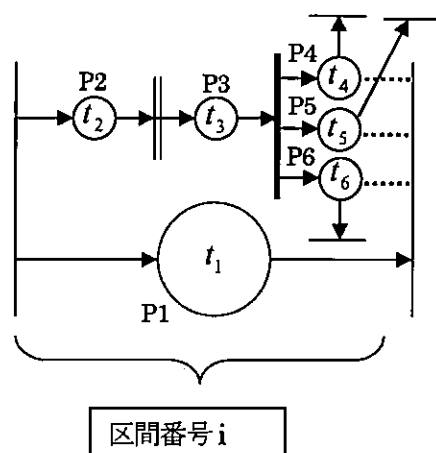
である。そして、ミクロシミュレーション結果の統計から求まる変量が、

m^k : ケース番号 k の交通量での平均旅行速度

σ^k : ケース番号 k の交通量での旅行速度の標準偏差

である。なお、プレースタイマが -1 とあるのは、それらのプレースにはタイマを設定しないことを意味している。この方式は、第 3 章では“空間の空き”を示すプレースの定義にも使用しているものである。

図 4-3-5(2)は、交差点部での阻害パラメータの設定法を示したものである。基本は単路部の場合と同じである。区間長は 90m に固定され、阻害プレースに緊急車両の旅行速度の最低速値 (γ) を用いて設定されるプレース 6 が加わることになる。



区間番号 プレース 番号	i	区間長 (m)	90
1	$t_1^k = 90/V$		
2	$t_2^k = -1$		
3	$t_3^k = -1$		
4	$t_4^k = 90/m^k$		
5	$t_5^k = 90/(m^k - \sigma^k)$		
6	$t_6^k = 90/\gamma$		

図 4-3-5 (2) 交差点部での一般車阻害パラメータの設定法

表 4-3-1 は、このようにして設定した単路部および交差点部での一般車交通による障害パラメータの一覧である。そして、表 4-3-2 が、これらのパラメータを、図 4-3-3(2)のシステムネットの Sdata のプレースタイル部に設定し、司令部ネットの時間帯指定プレースへの初期トークンの配置変更を行い、夜間と昼間火災への出動シミュレーションを実行した結果である。

経路Ⅰは、前述したように、夜間使用で、経路Ⅱは昼間使用である。まず、経路Ⅱの方が緊急車両の平均到着時間が 5~6 秒程度長くなっているが、交通量が 300 台/時のときにも、600 台/時のときにも、ほぼ同等の走行性を示すことが分かる。その意味では、地震時消防防災システムの障害性を点検するという目的の下で、これらの経路使用法を採用することには、問題はないだろう。

さて、図 4-3-6 は、4.2 の (2) で概説した火災延焼シミュレーションシステムを用いて、対象地域での延焼シミュレーションを行った事例である。気象条件は、北西の風で、風速が 10 m/s という強風下の想定のものである。4.2 の (2) で触れたように、ここでの時刻は、炎上からの経過時間であり、この点を割り引くとしても、この風速では、いずれの経路でも延焼阻止は困難となると推測される。

表 4-3-1 一般車障害パラメータ一覧

単路部・出発部			
600 台/時			
走行速度 (m/s)	出発部	単路部 (小)	単路部 (大)
m	4.92	9.31	10.26
m- σ	2.78	7.63	8.19
300 台/時			
走行速度 (m/s)	出発部	単路部 (小)	単路部 (大)
m	5.68	10.27	10.40
m- σ	3.47	8.63	8.83

交差点部		
平均速度 (m/s)	600 台/時	300 台/時
m	4.97	7.29
m- σ	2.65	2.87
γ	1.73	1.73

表 4-3-2 通常時走行シミュレーション結果

	300台／時		600台／時	
	経路Ⅰ	経路Ⅱ	経路Ⅰ	経路Ⅱ
SLM①	390	384	418	413
SLM②	400	402	420	425
SLM③	348	354	378	381
SLM④	364	371	388	393
SLM⑤	351	372	380	394
平均到着時間(S)	370.6	376.6	396.8	401.2
標準偏差	14.07	11.45	12.48	11.11

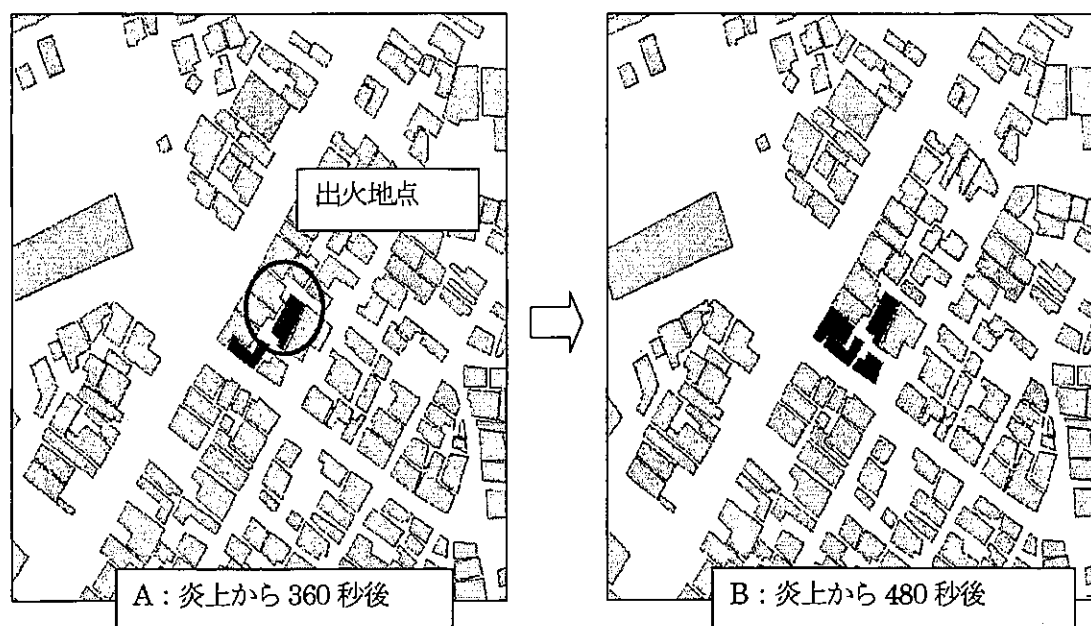


図 4-3-6 火災延焼シミュレーション実行画面（風向き：北西，風速：10m/s）

4. 4 地震時消防防災システムの動的点検・構築支援実践

(1) 地震時消防防災システムの点検・構築

著者等は、図 4-1-1 と図 4-1-2 で、地震時消防防災システムの点検・構築の概念図と手順を示し、4.3 では、それに従って、出発点となる通常時消防防災システムのペトリネット構築を実践した。地震時消防防災システムは、この通常時システムを、地震時を想定して点検し、阻害要因を洗い出し、構築済みのペトリネットに結合化させることによって構成されることになる。

図 4-4-1 は、図 4-1-1 ないしは図 4-1-2 に従って、通常時システムでの緊急車両の選定経路に対して、地震時阻害要因の点検・洗い出しの手順を示したものである。即ち、経路沿道の調査を行い、周辺画像を収集し、被害想定図と過去の震災画像を参照し、阻害判定を行う。そして、阻害の型に応じて、4.2 の(1)で準備した阻害ネットを、阻害想定位置に結合化して行く。ここでは、経路Ⅰには2箇所、経路Ⅱには3箇所の制約型阻害が想定され、切断型阻害は現場手前の橋梁の1箇所として検討を進めていく。

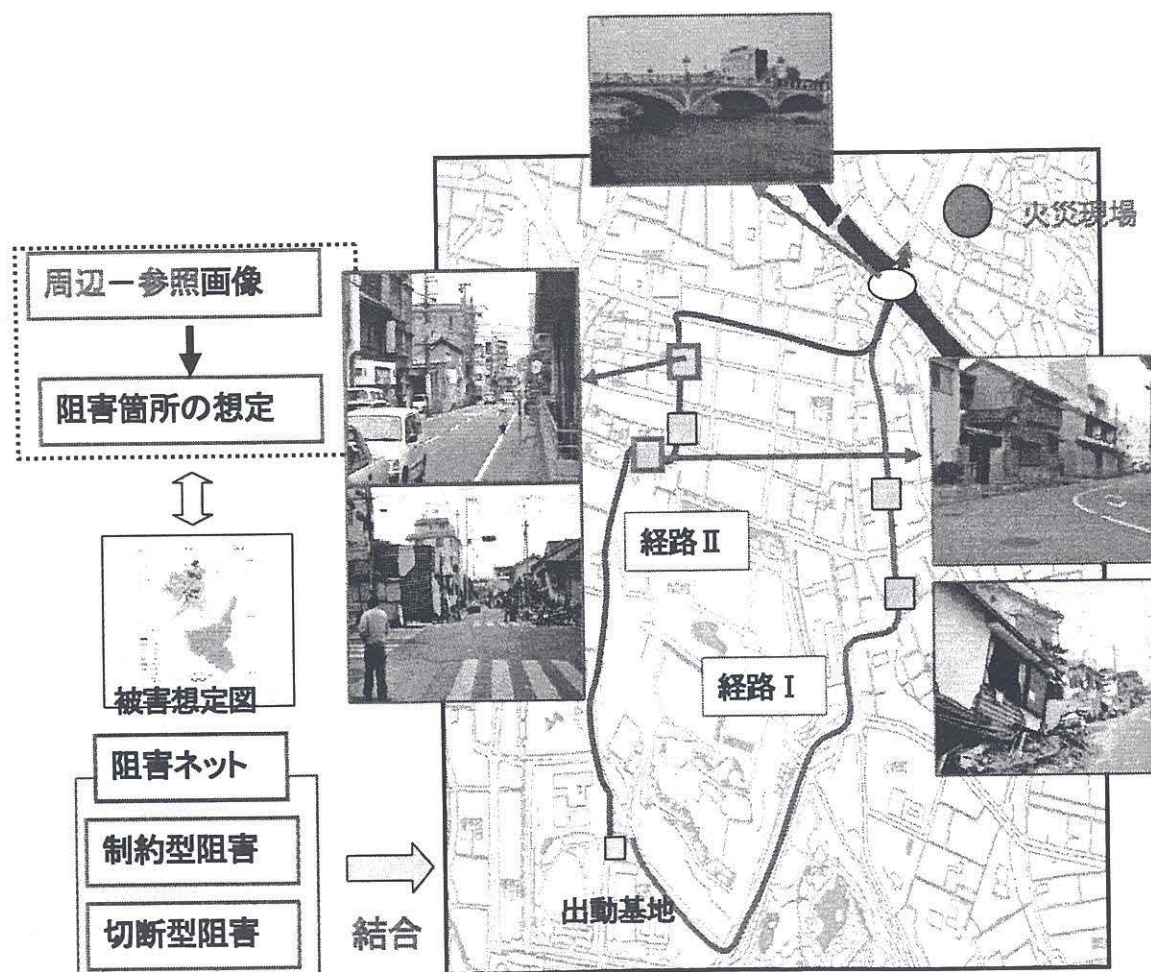


図 4-4-1 地震時阻害要因の点検手順

この結合化手順を示したものが、図 4-4-2 である。この具体的な手続きは、基本的には 4.3 で実践したものと同じであるが、既に大規模なネットへの結合化であるために、Sdata のコメント欄を活用し、阻害区間を検索することで、阻害部ネットとの結合に必要な関連プレー스とトランジションをリストアップし、それを参照しながらの作業となる。

切断型阻害が予想される地点では、阻害ネットの結合化と同時に、4.2 の(1)で準備した引き返しネットの追加構築も必要となる。図 4-4-3 は、この手順を示したもので、この場合には、さらに、切断時の迂回経路の点検・構築も必要となることを示している。

図 4-4-4 は、これらの結合化を終えて、表示・非表示機能を用いて、引き返しのプレー스配置と、迂回経路上のプレー스配置とを追加表示して示したネット図である。図 4-4-5 は、このネット図による引き返し、迂回走行の実行画面である。左上からスタートと右に進み、また左下という形で時間進行する画面例である。トークン(●)が、走行中の緊急車両の位置を示し、画面右下に経過時間が表示されている。

基地から出動した緊急車両は、経路Ⅱ(昼間地震想定)を使用して現場に向かい、河川(黒塗り)に架かる橋梁の切断的被害のためにその手前で引き返しプレースに移る。そして、引き返して迂回経路を走行し、経路Ⅱとは逆の方向から現場に到着する様子が示されている。

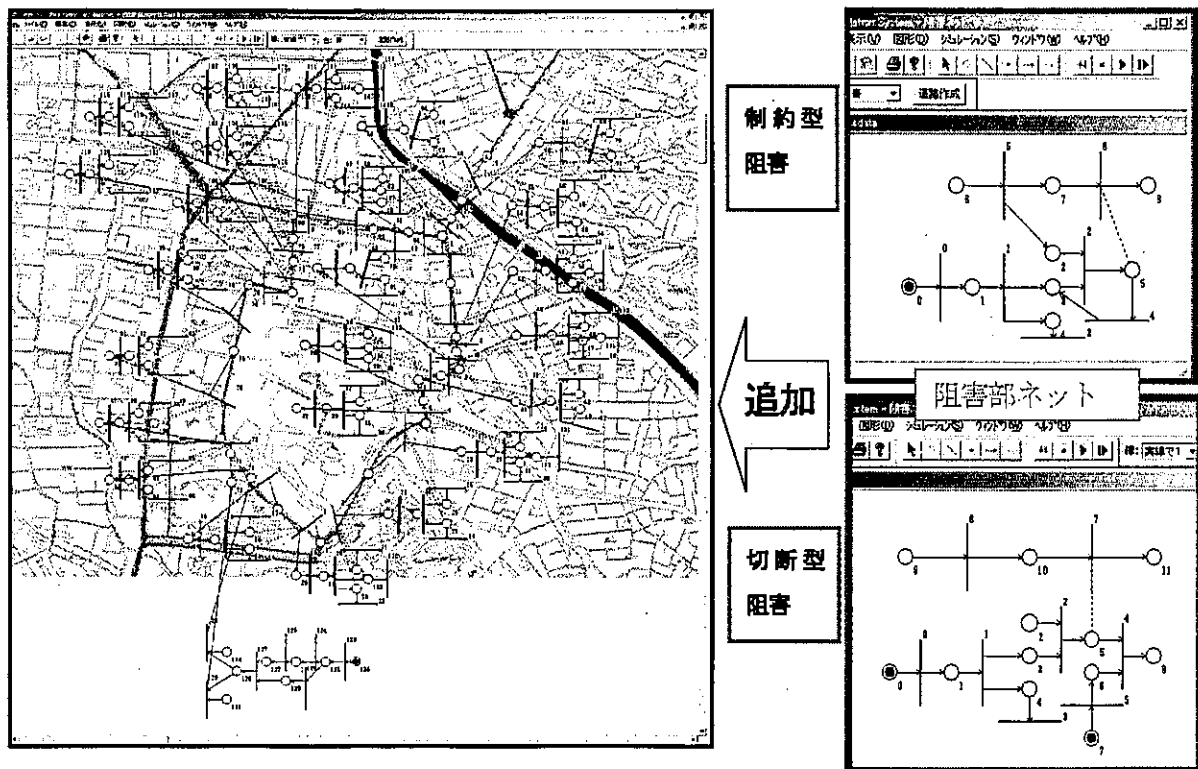
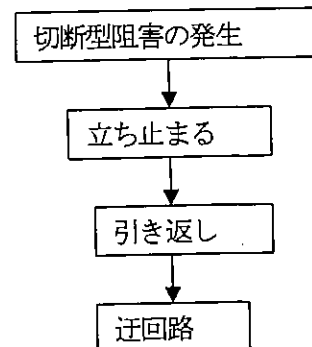
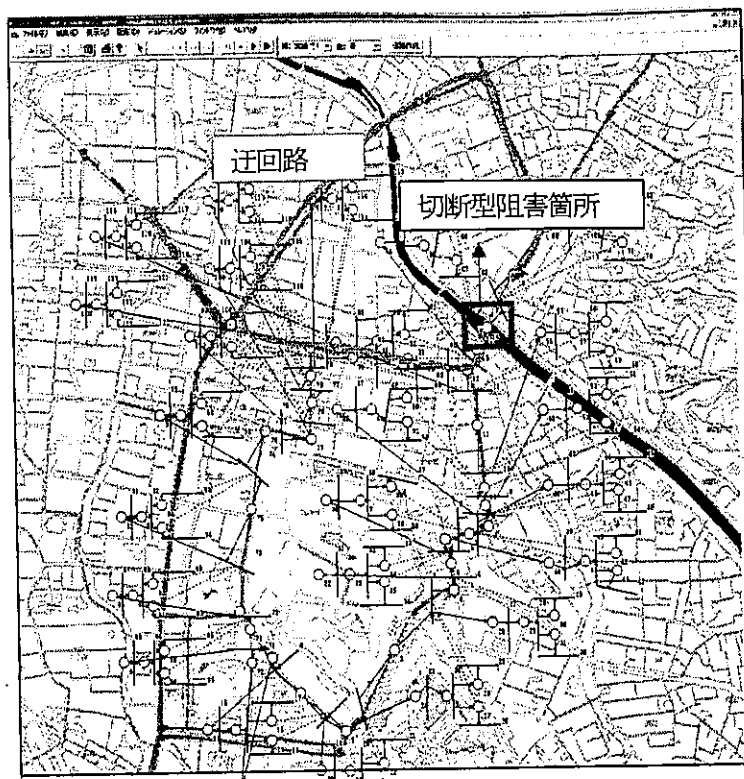


図 4-4-2 地震時阻害ネットの結合化



引き返しネットの構築
経路の追加

図 4-4-3 切断型障害の想定による点検・構築

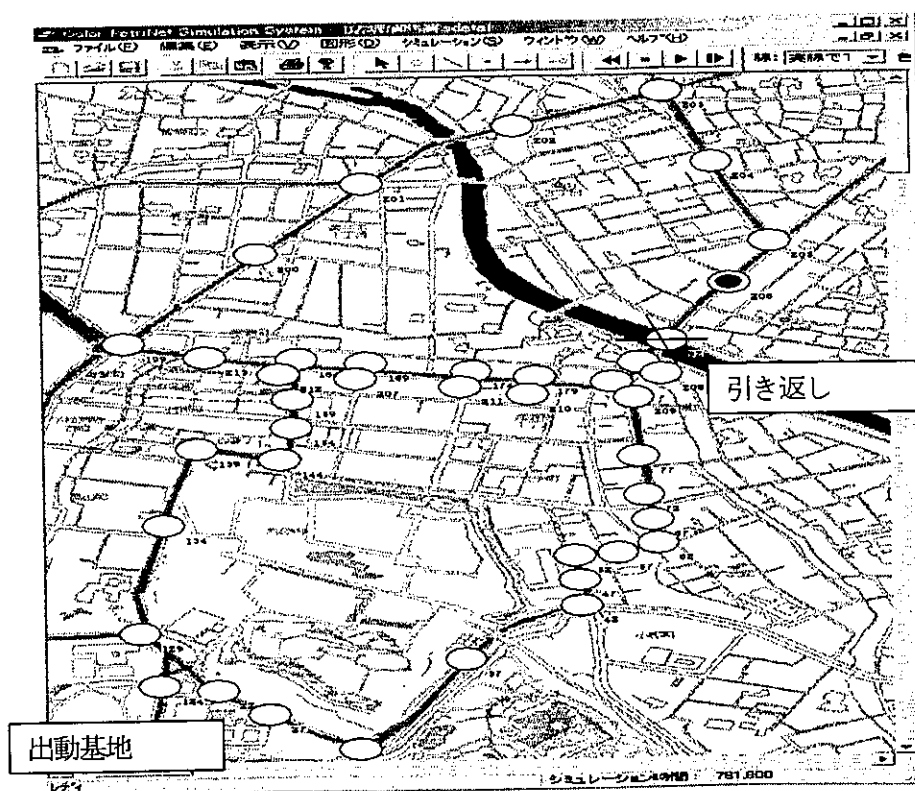


図 4-4-4 迂回路走行部ネットの追加・構築

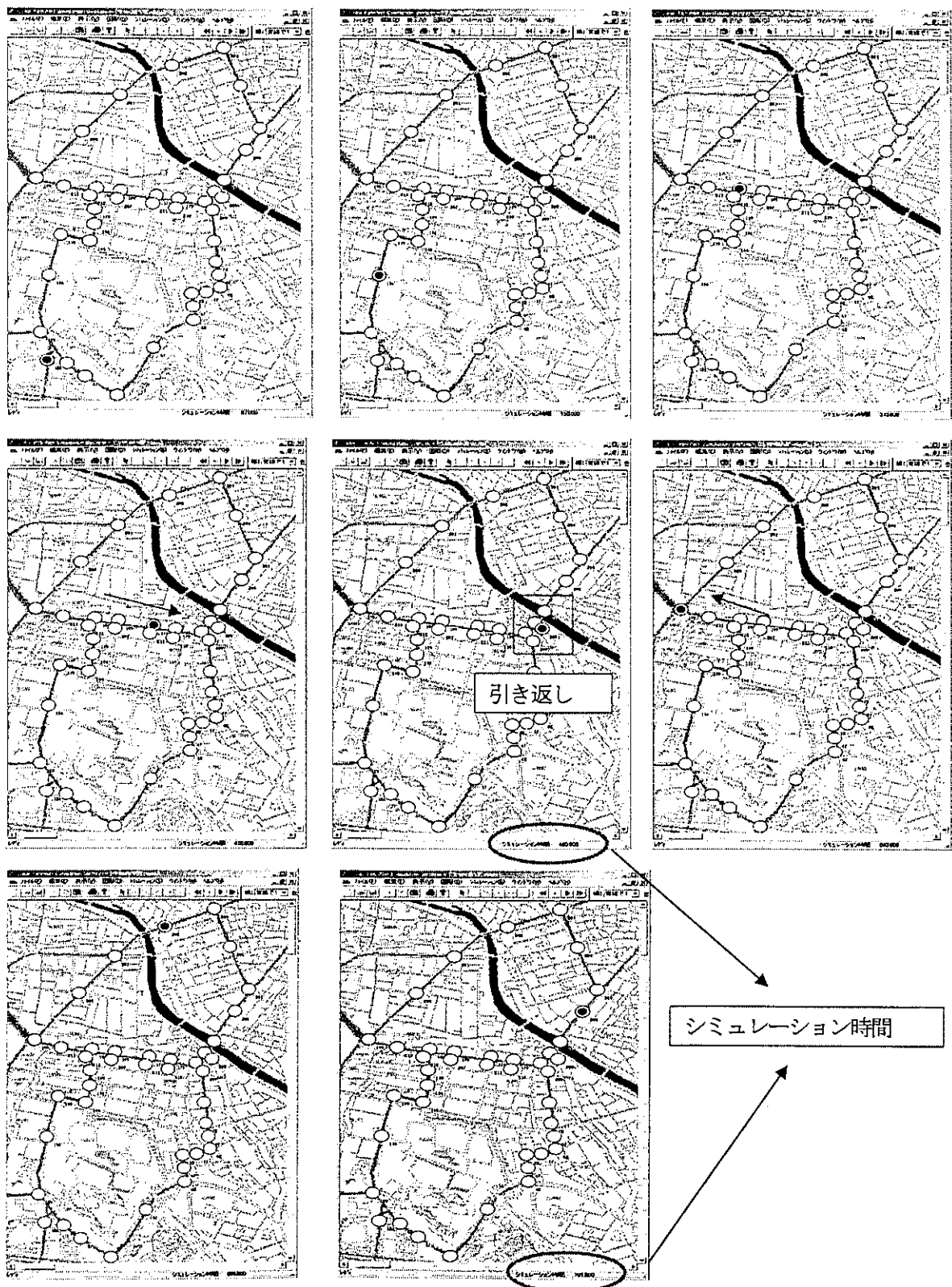


図4-4-5 切断型阻害時のシミュレーション実行画面

(2) 震害シナリオの点検シミュレーションと再構築支援

まず、地震時の生起阻害が制約型のみに限定されるケースのシミュレーションを行う。これは、切断型阻害ネットでのカラー生成確率を、非生起カラーを99.9とすることで実行できる。その結果を表4-4-1に示す。

通常時の表4-3-2と比較すれば、経路Ⅰでは90秒、経路Ⅱでは110秒程度の遅延となる。また、経路Ⅰと経路Ⅱを比較すれば、通常時にはほぼ同じであったが、阻害時には経路Ⅱの方が遅くなる。それは、阻害箇所数が経路Ⅰは2であるのに対して、経路Ⅱでは3であることによるもので、ほぼ25秒の差が出るが、標準偏差を考えれば、問題になるほどの差ではなく、軽微な地震では通常時経路指令でも良いだろう。

しかし、切断型阻害を伴う地震時には、著者等は、経路の点検に加えて、地震時火災出動に関する司令部システムの点検をも行う必要があると考える。即ち、震害による経路阻害の中、しかも多発性が想定される状況下での司令システムとして、通常時火災出動に求められる即時出動性になるいわば戦略的出動に繋がる案の模索が必要と考える。その出発点として、「震害情報の収集活動」を司令システムに加え、その結果を受けて出動指令を出すというシステム化である。

この改良は、図4-2-1(2)で構成した司令部システムのペトリネットを基に、図4-4-6(1)に示すように、確認作業の開始と並行して、情報収集の開始事象を付加することで、そのペトリネット化が容易に行える。ここでは、単純に、切断阻害の発生の有無が、想定現場での現実と直結した形で入手されるとしている。この部分の精緻化ないしは実現システムとの関連化は、それらのペトリネット表現化が進展すれば、結合化手法で容易に組み入れることができるだろう。

図4-4-4の経路構成から、切断情報が入手されたときには、経路Ⅱから迂回路へ直接向かう指令が出されるだろう。図4-4-6(1)の左方の塗潰しスペースへとトークンの移動は、まず、経路Ⅱの指令を行うものである。そして、右側の網掛けと塗潰しスペースが、図4-4-6(2)と連動して、経路Ⅱから迂回路への指令を行うものである。即ち、図4-4-6(2)において、基地を出発し、経路Ⅱを走行し、P0に到達した緊急車両は、P10の網掛けのスペースにトークンがあるときは、切断型阻害は発生しておらず、T1の方を発火させて、P2、P3と右折して、経路Ⅱをそのまま走行して行く。一方、P9の塗潰しスペースにトークンがあるときは、切断型阻害は発生しており、T4の方を発火させて、P7、P8と左折して、迂回経路のⅢを走行して行くという指令になる。

表 4-4-1 制約型阻害時のシミュレーション結果 (秒)

交通量	300	600	300	600
経路	I	I	Ⅱ	Ⅱ
S①	480	508	494	523
S②	490	510	512	535
S③	438	468	464	491
S④	454	478	481	503
S⑤	441	470	482	504
平均時間	460.6	486.8	486.6	511.2
標準偏差	14.07	11.45	12.48	11.56

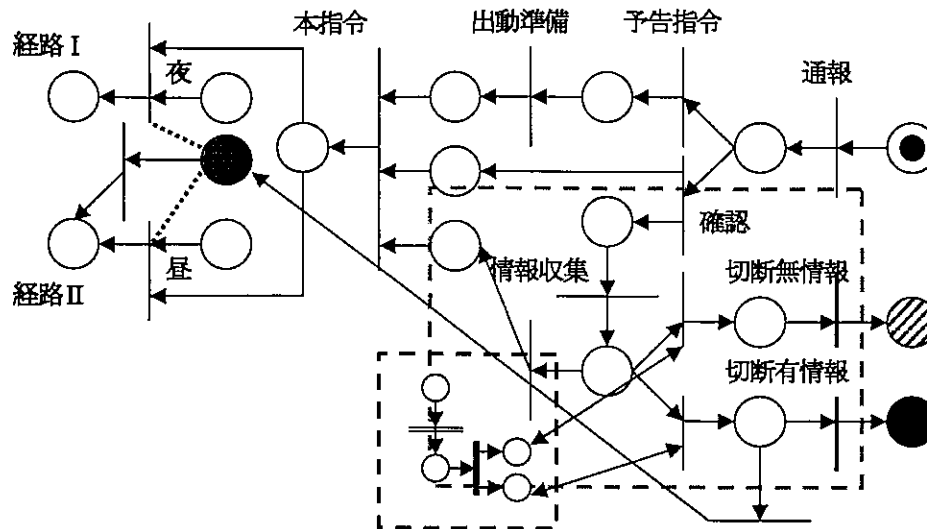


図 4-4-6 (1) 地震時司令部ネットの点検・構築

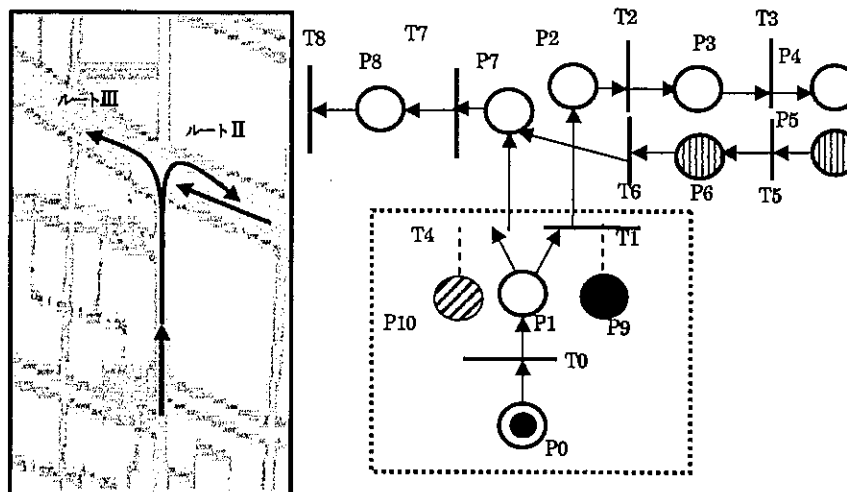


図 4-4-6 (2) 交差点部での司令接続ネット

図 4-4-6(3)に、司令部ネットを拡張化し、かつ交差点部での指令制御のネットを組み込んだ地震時消防防災システムのシミュレーションネットを示す。ここでは、全ての要素を“表示”としてあるが、シミュレーション実行時の出力画面として使用するときには、図 4-4-4 や図 4-4-5 のように、必要な要素のみを“表示”とし、利用者による視覚的な挙動確認が可能となる形式を取る。このことで、点検に際して、多くの人々の経験智の活用が可能となるだろう。特に、災害時の計画の議論では、実証的アプローチは極めて困難であることから、ペトリネットによる動的点検・構築支援の方法論は、この点で優れていると考えている。

この図 4-4-6(3)のシステムネットを用いて、切断型阻害の発生を想定したシミュレーションを行う。ここでは、情報収集活動の有無のシミュレーションシナリオとなる。表 4-4-2 にシミュレーション結果を示す。

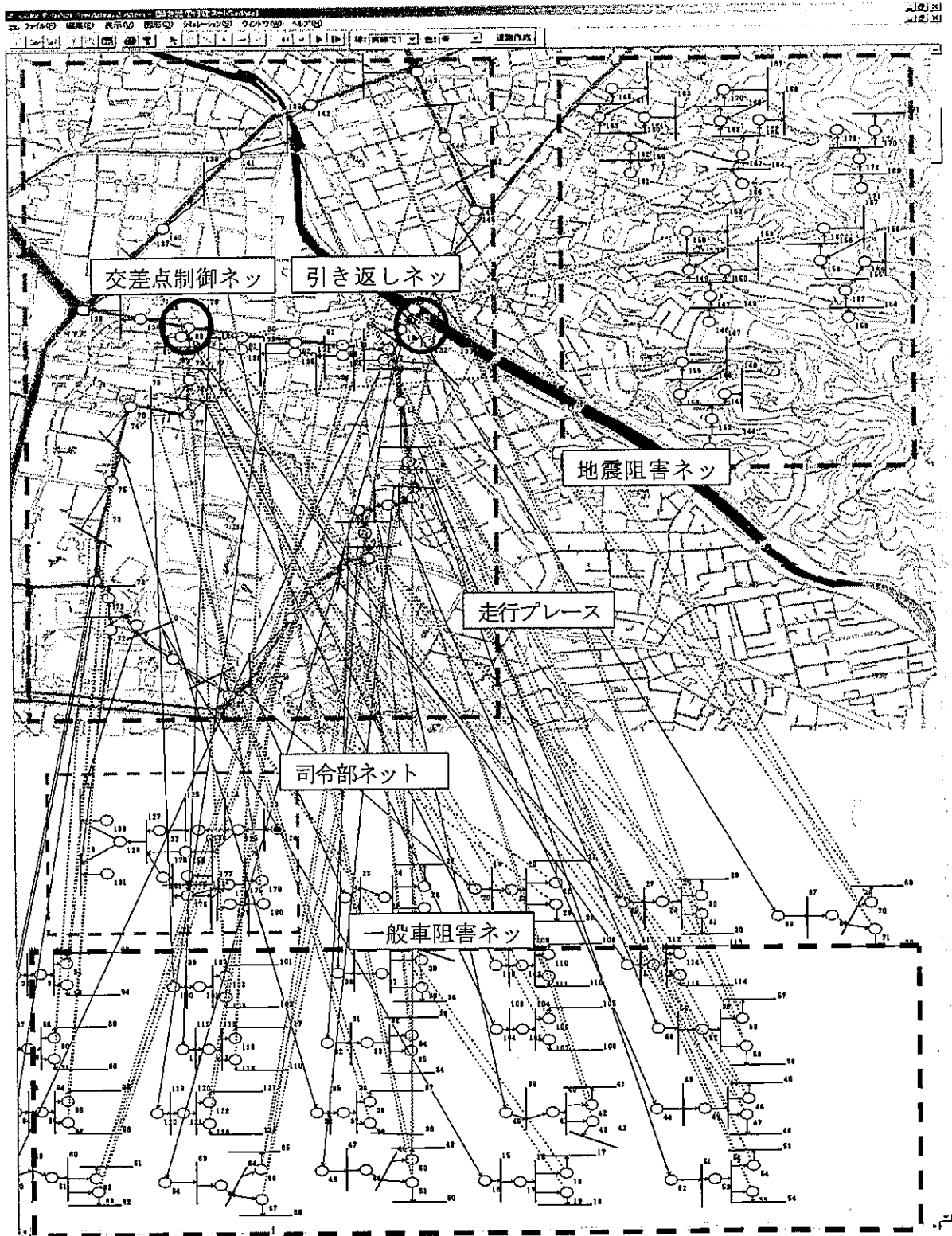


図 4-4-6 (3) 地震時緊急路網走行性シミュレーションネット

夜とあるのは経路Ⅰの使用に、昼とあるのは経路Ⅱの使用に対応する。「切断障害なし・情報収集なし」が、上で実行した制約型障害のみのケースで、表 4-4-1 の結果を用いてある。交通量は、300 台/時のケースである。

＜切断障害無し＞では、情報収集を行えば、それに要する時間の遅延が発生するが、＜切断障害有り＞の場合には、夜・昼ともに＜情報収集＞の方が短時間で現場到着となる。これは、情報収集なしで即時に出動した場合には、切断障害箇所まで引き返し、そこから迂回路経由で駆けつけることになるが、情報収集有りのシステムでは、出動時に経路指示がなされ、この引き返し走行分が不要となることによる。

昼間地震のケースでは、この所用時間の差は 180 秒強となる。これを図 4-4-7 に示す火災延焼シミュレーション結果との関係で検討すると、道路を越えての延焼拡大を許すか、阻止できるかの分かれになっていることが分かる。司令部において情報収集活動に割ける時間は、このような火災延焼の予測システムとの連動化によって点検することが必要であり、その意味では、火災延焼の予測情報も経路障害情報と並ぶ重要な対象となる。

表 4-4-2 拡張司令部のシミュレーション結果

	切断障害無し		切断障害有り	
	夜	昼	夜	昼
情報収集無	460.6(14.07)	486.6(12.48)	770.3(14.78)	795.9(13.64)
情報収集有	520.06(14.07)	546.8(12.48)	612.4(11.56)	612.4(11.56)

通報から現場到着までの時間：秒（標準偏差）

180秒差



図 4-4-7 情報収集時間の点検風向き：北西 風向：10m/s

4. 5 あとがき

本章では、地震時消防防災システムの動的点検・構築支援に、第2章で述べたペトリネットによる方法論を適用し、具体的な地域を対象に、システムネットの構築から始めて、そのシミュレーション実行結果を受けての再構築までの展開を行った。その中で、第3章で開発した緊急車両走行のマイクロペトリネットとの連携化、さらには火災延焼シミュレーションとの連携化まで、より広範な視点での実践を行うことができた。

地震時消防防災システムについては、その実行性を確保するためには、通常時のシステムを基礎にする必要があるが、それに縛られることは避けなければならない。即ち、基礎としつつ、地震時での機能環境を想像し、それへの対応性の点検と工夫を常に行う必要がある。ここで展開した背景画像上でのペトリネット構築法によるアプローチは、この点で貢献することができるだろう。地震時消防防災システムにおける情報収集活動の付加と、その結果による戦略的出動指令という案を検討したが、本文でも付記したように、その収集システムの具体化や、さらには収集すべき情報カテゴリー等の検討が今後の課題となる。

それ以上にこの課題には、現場での困難事が予想される。現に炎上している現場を素通りし、戦略的重要地点に駆けつけられるかという価値と倫理の対立がその一つである。これらの解決にも、参加型の支援システムが重要となり、ここで展開したシステムをより容易に使用できる形へと進化させることに勤めたいと思っている。

4. 6 参考文献

- 1) 木俣昇, 高木秀彰, 黒川浩嗣: ペトリネットによる交通流シミュレーションシステムの開発, 土木計画学研究・論文集, No.12, 691-699, 1995.
- 2) 木俣昇, 鷺見育男: 消防防災システムの阻害要因のペトリネットシミュレーションに関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No.14, 393-400, 1997.
- 3) 木俣昇, 中村彰彦: 交通流ペトリネットシミュレータにおける背景画像上でのデータベース化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, 51-62, 2004.
- 4) 木俣昇, 曾根岳志: ペトリネットによる背景画像上での建物避難シナリオのシミュレーション研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, 2005.10, 53-64
- 5) 堀浩三, 木俣昇: ペトリネットシミュレータによる背景画像上での地震時緊急路の点検・構築支援システム, 土木計画学研究・講演集, 32 巻(CD-ROM 版) No.40, 2005.12.
- 6) 木俣昇: 大震時火災の延焼シミュレーション・システムの開発について, 金沢大学工学部紀要, 15 巻 2 号, 125-138, 1982.
- 7) 木俣昇: 大震時避難計画のためのメッシュ型火災延焼シミュレーション・システムに関する検証, JORSJ, Vol.30, No.1 59-86, 1987.
- 8) 木俣昇, 二神透: 大震時火災の延焼シミュレーション・システムの要因分析による都市の耐火構造の研究, 土木計画学研究・論文集, No.5, 123-130, 1987.
- 9) 木俣昇, 二神透: 防災緑地網整備計画のための火災延焼シミュレーション・システムの開発, 土木学会論文集, No.449/IV-17, 193-202, 1992.
- 10) 二神透, 木俣昇: 倒壊建物と炎上車両を考慮した地震火災危険分析, 土木計画学研究・論文集, No. 21, 341-348, 2004.

第5章 地震時市街地避難計画シナリオのペトリネットシミュレーション研究

5.1 まえがき

災害応急対応計画の一つである避難計画は、人命に直接かかわる重要な地震時減災対策であり、この計画の充実化とその訓練計画の常なる点検・再構築支援は、地震国であるわが国では、第3章と第4章で取り上げた消防防災システムと並ぶ社会的緊急課題の一つである。この計画も、市町村レベルでの責務とされ、避難場所の指定、自主防災組織の育成支援、避難訓練の実施がなされてきている。

指定避難場所は、ほとんどが市町村立の小中学校であり、避難対象者も各校下住民を基本的には想定している。避難訓練は、近年、種々の災害発生を受けて、自主防災組織を中心に試みられるようになったが、指定避難場所までの避難路移動体験が主で、火災想定を組み込んだ訓練の試みはまだ少数派である。本章では、まず、地震時避難計画シナリオの検討構図を示し、そのペトリネットシミュレーション構成に必要な部分ネットの整理を行う。次に、火災延焼シミュレーションとの連動の下で、建物倒壊による避難阻害が地点固定的であるのに対して、火災延焼による阻害が地点拡大的であることに対応するためのシナリオ構成法について検討する。最後に、第2章～第4章と同様に、ペトリネットシミュレータの特徴を活かして、背景画像上での避難場所の指定、地震時避難阻害要因の想定の下、避難計画シナリオのシステムネットを構築し、その動的シミュレーション結果による点検支援を行う。

5.2 市街地避難計画シナリオの基本部分ネット構成

(1) 避難シナリオの基本構成図

地震時避難計画シナリオは、図-5-2-1に示すように、その基本構図を提示し、検討することで発展的な点検支援が可能となる。即ち、避難の基本形は、この図の中央に示されているように、住民が災害認知を契機として避難行動を開始し、避難経路を移動して避難場所に到達するというものである。この過程を規定する様々な要因を検討することで、災害状況をより反映した避難計画シナリオの作成が可能となり、その検討を通じてさらに減災に繋がる避難計画シナリオに行き着き、避難訓練計画への反映化によるその強化も可能となる。ここに至って初めて真の減災に結び付くといえよう。

図-5-2-1の基本構図は、①避難開始部、②避難経路移動部、③避難場所到着部、および④避難阻害部によって構成されている。それぞれについてシナリオが考えられるが、本章では、まず、避難者は、その地に居住する人々で、避難は世帯単位でなされ、避難場所は既知であるとする。

個別には、①の避難開始部では、避難開始の条件についてのシナリオを展開する。基本形は、住民の災害認知による個別判断であり、避難勧告では個別判断がなされ、避難指示では即時避難開始というシナリオをまず取り扱う。もう一つのシナリオとして、自主防災組織での判断と伝達による避難を取り上げる。②の避難経路移動部では、避難経路の分岐部と合流部のシナリオを組み入れる。前者については、確率的選択を基本とし、災害情報の伝達想定時には経路指示がなされるとし、その組み入れを行う。後者については、方向別の優先順位は設けず、道路空間の容量制限も設けない。また、③の避難場所到着部についても特殊なシナリオは想定しない。ただし、これらは本章での適用市街地の地域特性による判断であり、モデル化上での制約ではない。

最後の④避難阻害部については、本研究課題の主テーマであり、地震災害に伴う避難阻害の種々の相を点検する。まず、避難経路沿道の建物倒壊による阻害を考えなければならない。これについては、道路幅いっ

ばいを倒壊建物が塞ぐ切断型の阻害シナリオと、倒壊建物によって通行幅が狭められる制約型のシナリオが検討対象となる。

もう一つの市街地震での阻害要因は、火災に伴うものである。阪神淡路大震災は、わが国の市街地には、依然として地震火災リスクが存在し、その対応が緊急の課題であることを示すものであった。各自治体による防災計画書作成の基礎資料である被害想定図でも、地震火災被害が大きく取り扱われている。図-5-2-2(1)、(2)は金沢市の被害想定図で、本章で展開する地域は、炎上出火件数と延焼出火件数の想定が共に3以上に該当する。

火災による避難阻害は、建物倒壊による阻害と同様に特定の地点に限定的な場合もあるが、延焼拡大により阻害地点が移動し、拡大する点に特徴がある。ペトリネットによるこのシナリオの組み入れ法については、5.3 で具体的に示すとし、以下では、上述の想定の下で、図-5-2-1 の基本部分のペトリネット記述について述べる。

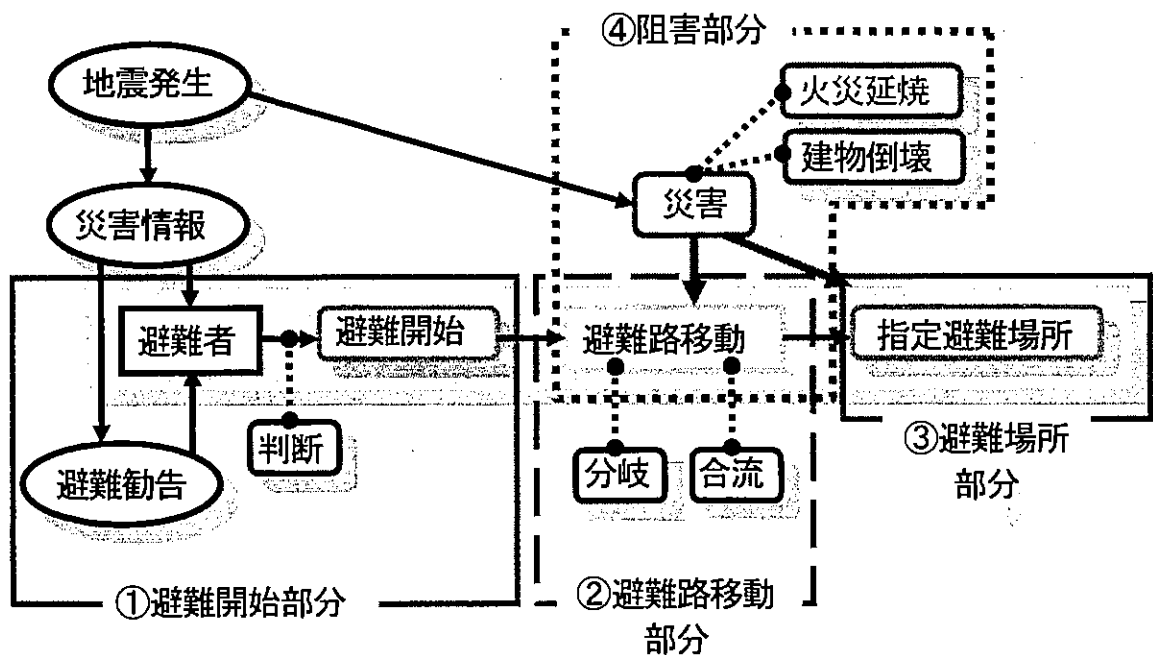


図 5-2-1 避難シナリオの基本構成図

(2) 避難開始部シナリオの基本ペトリネット

まず、図-5-2-2(1)に避難開始部の基本シナリオと、そのペトリネット表現図を示す。即ち、避難開始事象を意味するトランジション T0 の入力条件は、屋内に避難世帯が居て、避難情報が提示されたときとするもので、プレイス P0 と P4 がそれらに対応している。このネット図では、避難情報は「避難指示」であり、避難者は直ちに避難を開始し、避難路に出ることになる。プレイス P1～P3 は、路上に出た避難者の移動中の道路空間に対応し、トランジション T1、T2 は、それぞれ前方空間への移動事象に相当する。ここでネット図中のトークン(●)は、基本想定のところでも述べたように、プレイス P0 と P1～P3 上のは避難1世帯に対応する。P4 上のは「避難指示」情報に対応する。

避難開始部シナリオの(1)での基本想定では、避難開始は住民の災害認知による個別判断によるとした。図-5-2-2(2)は、図-5-2-2(1)の避難開始部ネットに、点線で囲むネットを、ペトリネットの特徴である結合性を利用して結合化させて、この基本想定を組み込みを行ったものである。点線で囲むネットは、トークンカ

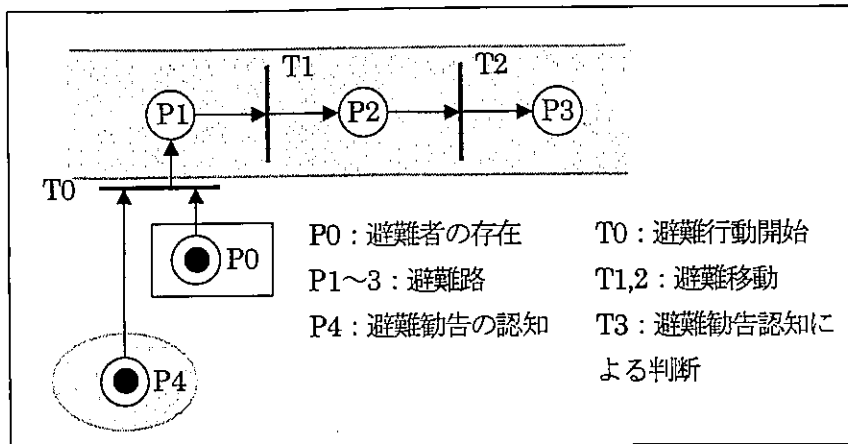


図 5-2-2(1) 避難勧告発令による避難開始部モデル

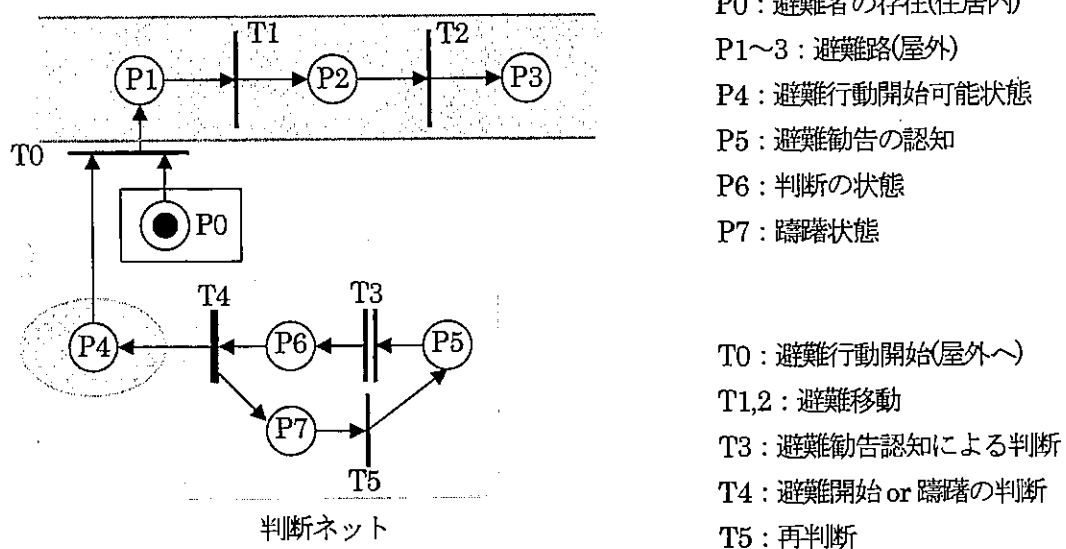
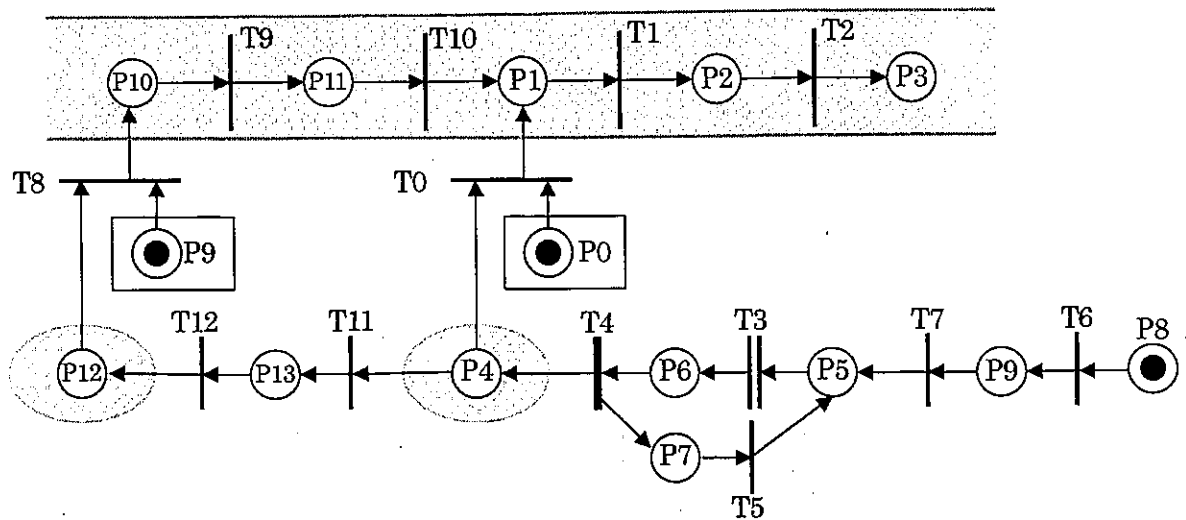


図 5-2-2(2) 避難勧告発令による避難開始部分モデル

ラーの生成トランジション T3 とその出力先プレースの選択トランジション T4 を持ち、プレース P4 に出力されたときに避難が開始されることになる。一方、プレース P7 に出力されたときは、T5 を介して P5 に戻され、再度判断がなされるというネットとなっている。

プレース P7 にプレースタイマを設定することによって、躊躇による避難開始遅れの組み込みが可能となる。そのような避難世帯の構成比率シナリオは、生成トランジション T3 のカラー生成確率の設定で可能となる。また、避難指示情報の発令シナリオは、T3 のカラー生成確率を P4 出力カラーに対して 0.99 とすることで、そして、発令時刻シナリオは、プレース P5 への初期配置トークンタイマの設定により可能となる。

最後に、図-5-2-2(3)に自主防災組織を通じての避難開始部ネットを示す。このネットでは、プレース P0 を地区のリーダー世帯とし、そこに避難情報が通報され、リーダーの判断で避難決定がなされる。その結果がメンバー世帯に伝えられ、地区での避難が開始されるという構成となっている。このネットでは、発令時刻シナリオはプレース P8 への初期配置トークンタイマの設定でなされる。また、このネットでは伝達経路の表示もあり、その点検によるそれらへの阻害シナリオの組み入れ展開も可能となっている。



- | | |
|------------------|--------------------|
| P0 : 避難者の存在(住居内) | T0 : 避難行動開始(屋外へ) |
| P1～3 : 避難路(屋外) | T1,2 : 避難移動 |
| P4 : 避難行動開始可能状態 | T3 : 避難勧告認知による判断 |
| P5 : 避難勧告の認知 | T4 : 避難開始 or 躊躇の判断 |
| P6 : 判断の状態 | T5 : 再判断 |
| P7 : 躊躇状態 | T6 : 避難勧告の発令 |
| P8 : 地震発生状態 | T7 : 避難勧告の認知 |
| P9 : 避難勧告の発令状態 | |

追加プレース	追加トランジション
P10,11 : 避難路	T8 : 避難行動開始(屋外へ)
P12 : 避難行動開始可能状態	T9,10 : 避難移動
P13 : 避難勧告伝達時間	T11 : 避難勧告の伝達
	T12 : 避難指示

図 5-2-2 (3) 避難勧告の伝達による避難開始部分モデル

(3) 避難経路移動部シナリオの基本ペトリネット

図 5-2-2 のネット図に既に経路移動の基本ネットが出て来ている。この移動部において、経路の分岐点と合流点での移動ネットを加えたものが、図 5-2-3 である。分岐点とは、いずれの道路からも避難場所に向かえる地点のことで、避難者は経路を選択しなければならない。災害時であるために、通常時の最短時間経路が必ずしも有効とはいえない。そのために、ここでも避難開始部ネットと同様の確率選択ネットを使用する。

この部分のペトリネットは、(2)で使用した判断ネットと同じである。通常時の最短時間経路に優位性を想定することは、上述したカラー生成確率の設定で可能となる。また、震災による経路阻害情報の提供が可能で、方向指示が出せるというシナリオでは、T8と例えばT3を抑止するプレースの追加で取り扱うことができる。このケースでは、P1に到達した世帯は、左折ではなく直進が指示されていることになる。

合流点とは、避難路に向かう道路への到達地点のことである。図-5-2-3では、左右からの避難者流は、上方の道路に合流することになる。この部分では、人数が増えるために、道路幅員との関係で混雑するが、基本想定で述べたように、ここでは適用場所の地域性から容量制約は考慮していない。また、優先性をも想定していないために、双方から同時に合流点に到着した場合は、図に示すように、複数個のトークンが1つのプレースに配置されることになる。逆に言えば、そのような視覚的出力化を用いて点検することで、この問題についての展開・経路整備の提言、あるいはネットモデルの精緻化も可能である。

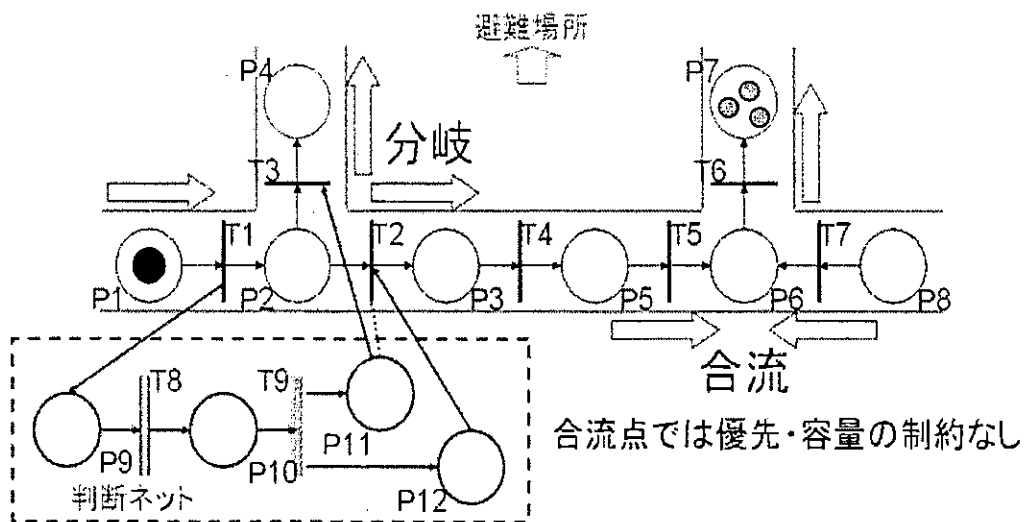


図 5-2-3 避難経路移動部分

(3) 避難阻害要因部シナリオの基本ペトリネット

図-5-2-1に示したように、地震時の避難計画では、震害に伴う避難阻害の発生の考慮が最重要課題となる。その第一が沿道建造物の倒壊・散乱による阻害である。これには、図-5-2-4に写真に示すように、避難路が完全に塞がれて切断状態になるケースと、避難路の一部が塞がれ、通行が制約されるケースとが考えられる。

切断型は、図-5-2-5(1)に示すように、経路移動の基本ネットに、点線で囲むネットを追加・結合化し、経路の閉塞状態を意味するプレースP3から、阻害地点への進行事象に対応するトランジションへ抑止アーク(…)を伸ばすことで表現できる。一方、制約型は、図-5-2-5(2)に示すように、P5を追加・結合化し、P3にタイマを設定し、抑止先のトランジションの発火をタイマ分遅延させることで表現できる。T2を介してトークンをP4に戻しているのは、後続の避難者にも同様の遅延を想定するためである。

合流部のネットでは1つのプレースに複数個のトークンが配置されることがあるとした。これは道路容量の制約性を地域特性からここでは考慮しないとしていることによる。しかし、制約型阻害地点では、移動速度の低下とともに容量の変化度が問題となる。この考慮は、図-5-2-5(3)に示すように、道路容量を示すプレースP6を配置し、そこに容量に対応する数分のトークン(この例では3世帯)を設定することで可能となる。即ち、トランジションの抑止によってP1にトークンが滞留するが、T0の入力条件にP6を加えることによ



切断型阻害



制約型阻害

図 5-2-4 建物倒壊による阻害

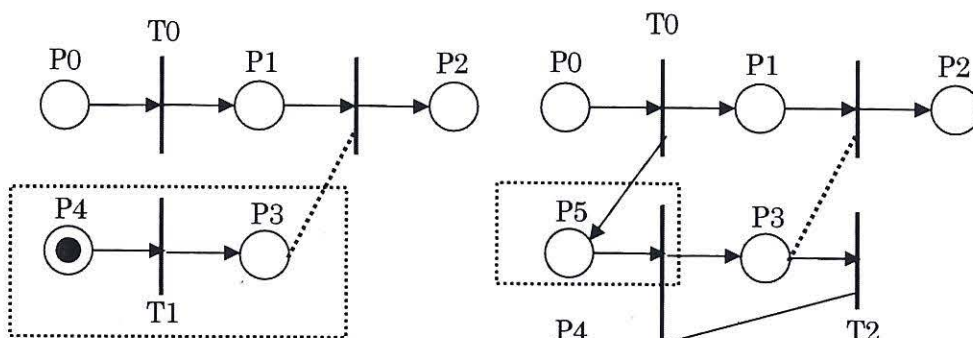


図 5-2-5(1) 切断型阻害ネット

図 5-2-5(2) 制約型阻害ネット

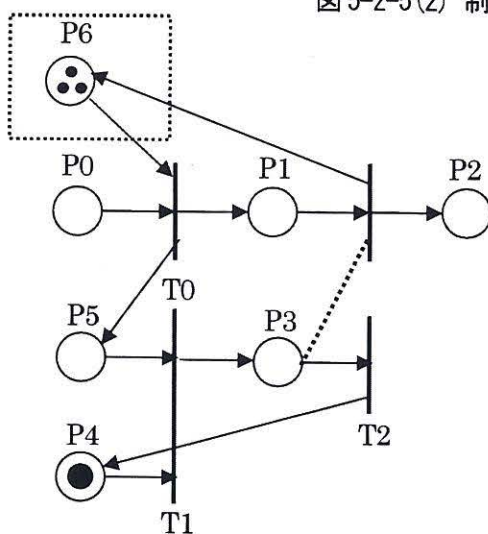


図 5-2-5(3) 避難路の容量制約化ネット

り、その発火回数が制約されることになり、P1には最大3世帯の滞留という制約が表現されることになる。

抑止が解除され、P1に滞留していたトークンが前方に進むと同時に、P6のスペースにトークンが戻され、T0の発火が可能となる。この繰り返りで空間制約に伴う容量制約が動的に働くことになる。

切断型阻害では、避難者は当然その地点からの引き返し行動を取る。図-5-2-6は、図-5-2-5(1)に示した切

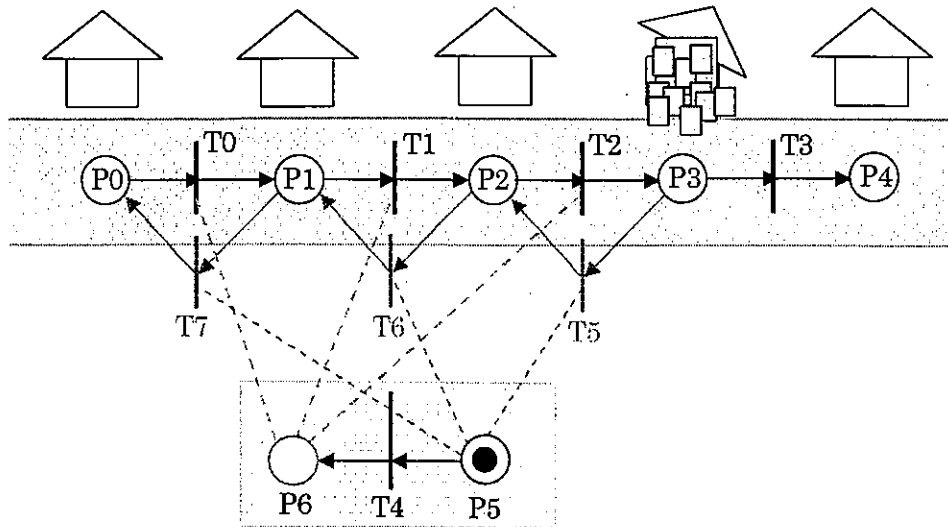


図 5-2-6 建物倒壊による切断型阻害と引き返しネット

断型阻害の基本ネットに、引き返しトランジション T5～T7 を追加し、非閉塞状態を意味するプレース P5 からこれら引き返しトランジションへの抑止アークを設定し、切断・閉塞状態を意味するプレース P6 から非阻害時の進行トランジション T0～T2 への抑止アークを設定することで、避難者の引き返し行動の組み込みを行っている。

図 5-2-5 で示した阻害ネットは、図 5-2-6 に示すように、阻害発生位置との関係で、抑止先トランジションを確定し、移動ネットに結合されることになる。ペトリネットシミュレータでは、第 4 章で実践したように、背景画像上でのネット構築法により、これらの確認を行い、Sdata のコメント文を検索することで、これらの構築支援が可能となる。

5. 3 地震火災延焼シナリオのペトリネット化

(1) 火災延焼シミュレーションとの連動化

5.2 の (3) で、地震災害時の避難阻害を制約型と切断型に分けて、その基本ペトリネットモデルについて説明をした。建物倒壊や地盤破壊に伴う場合には、それらが制約型であれ切断型であれ、阻害地点は固定的であるが、火災による場合には、延焼に伴い阻害地点が変化して行く。このことを避難計画シナリオのペトリネットシミュレーションに組み入れるために、本節では、著者ら開発の火災延焼シミュレーションシステムとの連動化について検討する。

このシミュレーションシステムについては、第 4 章でも援用したが、必要部分を再掲する。まず、図 5-3-1(1) がシステムの概要で、対象地域から 3 つのデータファイルを作成し、実行プログラムによる火災延焼シミュレーションを行う。その基本形は、延焼速度式のメッシュ化による市街地シミュレーションで、出力を建物形状に対応させてポリゴン形式としたものである。図 5-3-1(2) が、3 つのデータファイルの概要であり、いずれも対象地域の地図画像をベースにして作成されるものである。

地震火災の組み入れでは、地震時火災の同時多発性と、地震発生時の気象条件による延焼動態の変化性がポイントとなる。図 5-3-2 は、本シミュレーションシステムによる同時多発火災の延焼シミュレーションの実行画面例である。

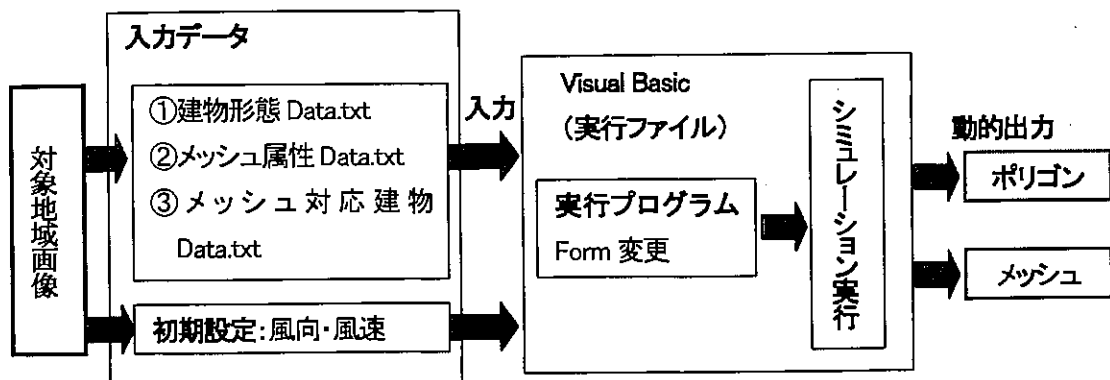


図 5-3-1 (1) 火災延焼シミュレーションシステムの概要

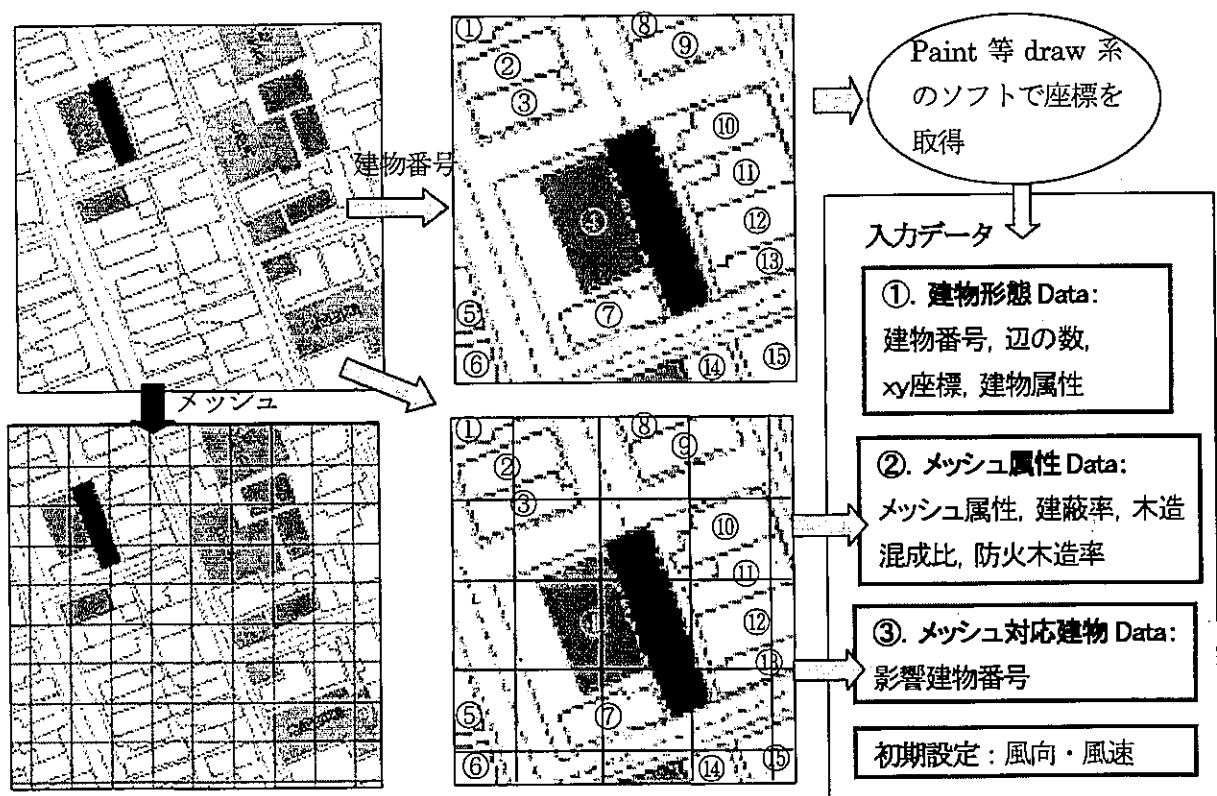


図 5-3-1 (2) 火災延焼シミュレーションシステムの概要

この例は、出火点を図に示す①～③の3箇所とし、地震発生時を冬の昼とし、対象地域の気象条件から、風向は北西、風速は6 m/s と設定し、時間経過に伴う延焼拡大状況の出力図を示したものである。そして、図 5-3-3 の(1)と(2)は、気象条件を変更してシミュレーション実行を行ったもので、出火点①のケースの比較図である。対象地域の金沢では、昼と夜で風向が逆になる。図 5-3-3 の(1)が、冬の夜で、南東の風、5 m/s のケースであり、図 5-3-3 の(2)が、冬の昼で、北西の風、6 m/s のケースである。42分後の結果を比較すれば、火災延焼に伴う避難障害の位置が大きく異なっており、避難計画シナリオの検討に際して地震発生時の組み込みが必要であることが分かる。次項では、図 5-2-6 に示した切断型障害の発生に伴う引き返しネットを基に、火災延焼シミュレーションとの連携の下で、地震発生時の気象条件の組み入れと、火災延焼に伴う障害点の移動の組み入れ工夫について述べる。

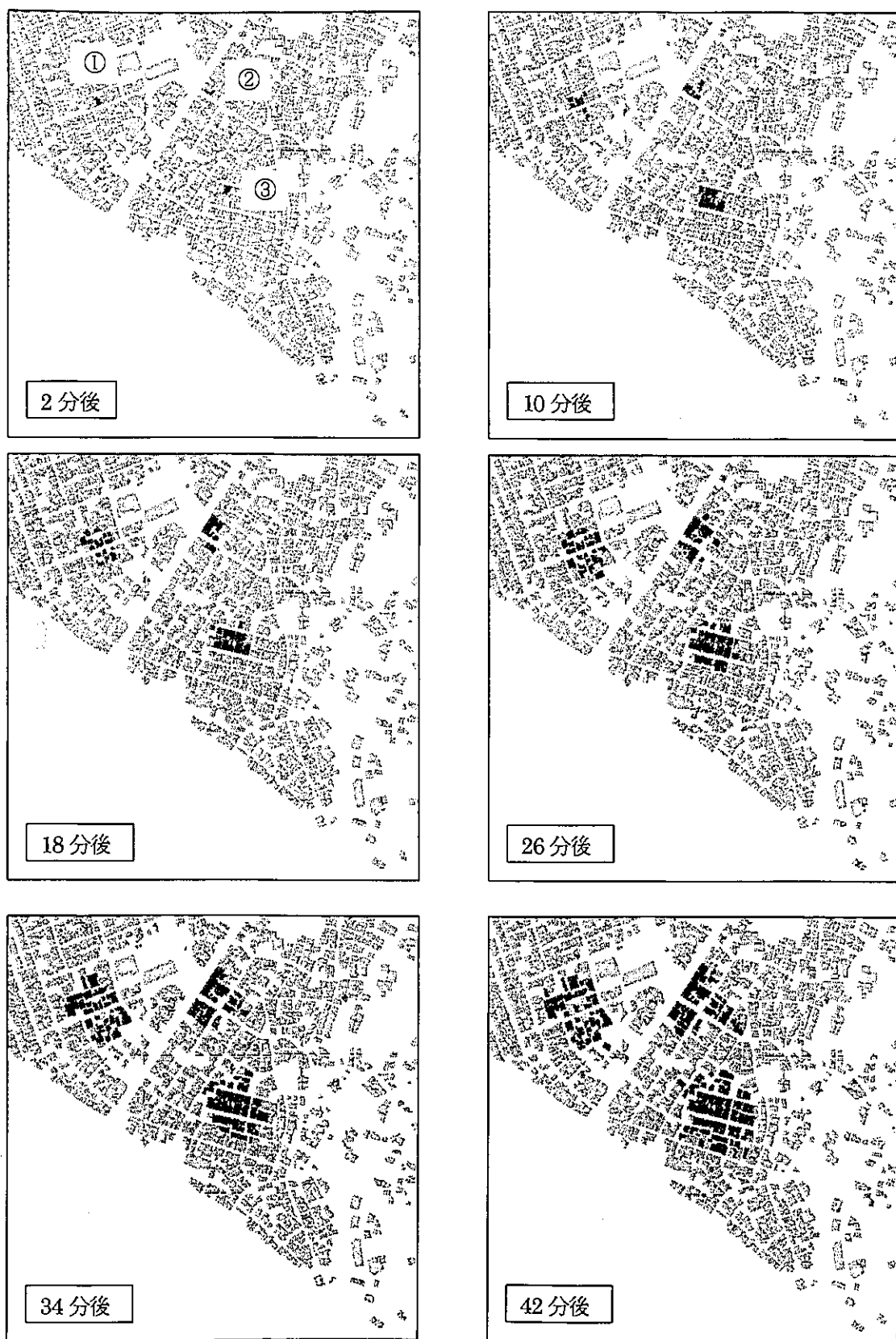


図 5-3-2 火災延焼シミュレーション事例 (3 箇所からの同時出火)

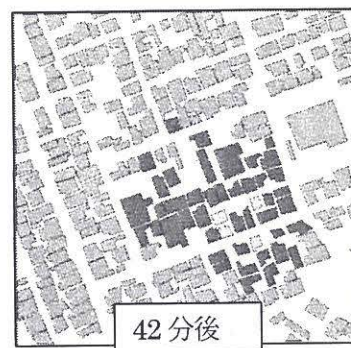
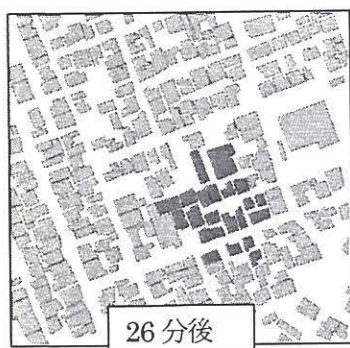
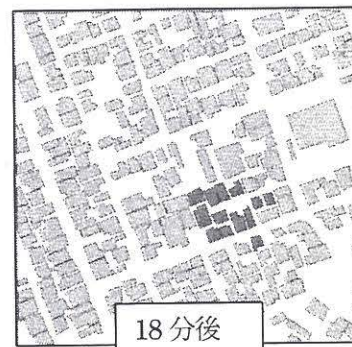
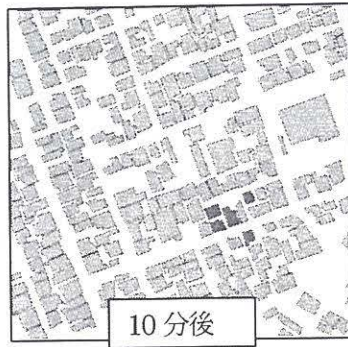


図 5-3-3(1) 延焼シミュレーション実行画面(冬の夜 風向=南東 風速=5.0m/s 地点①)

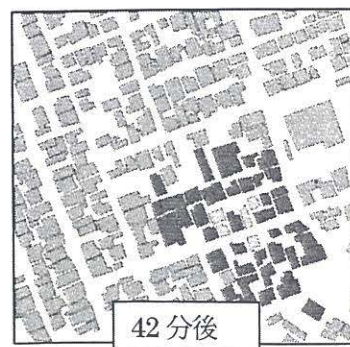
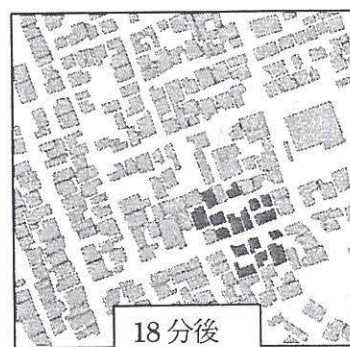
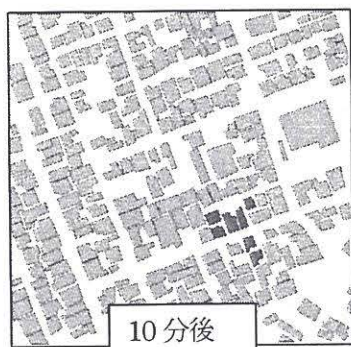
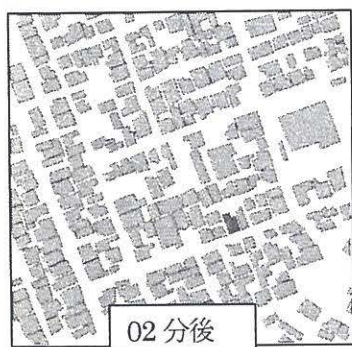


図 5-3-3(2) 延焼シミュレーション実行画面(冬の昼 風向=北西 風速=6.0m/s)

(2) 地震時火災阻害シナリオのペトリネット化

まず、図 5-3-4(1)に、図 5-2-6 に示した切断型阻害の基本ネットに、火災発生による阻害・抑止プレーズ P7 を付加して構成したネットを示す。このネットでは、P7 にトークンが打たれることによって、T4 が発火し、トークンが P6 (切断閉塞状態) に出力され、引き返しが開始されることになる。

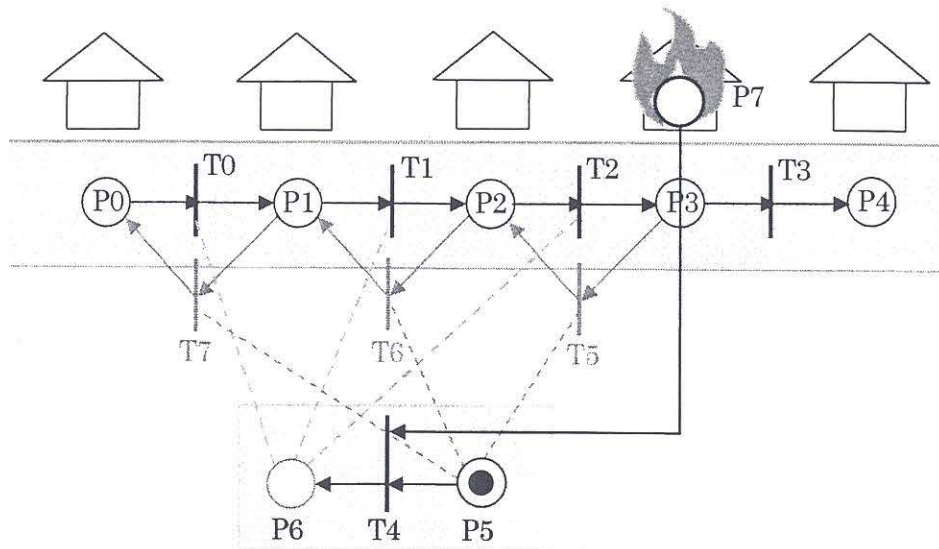


図 5-3-4(1) 火災阻害による引き返しモデル

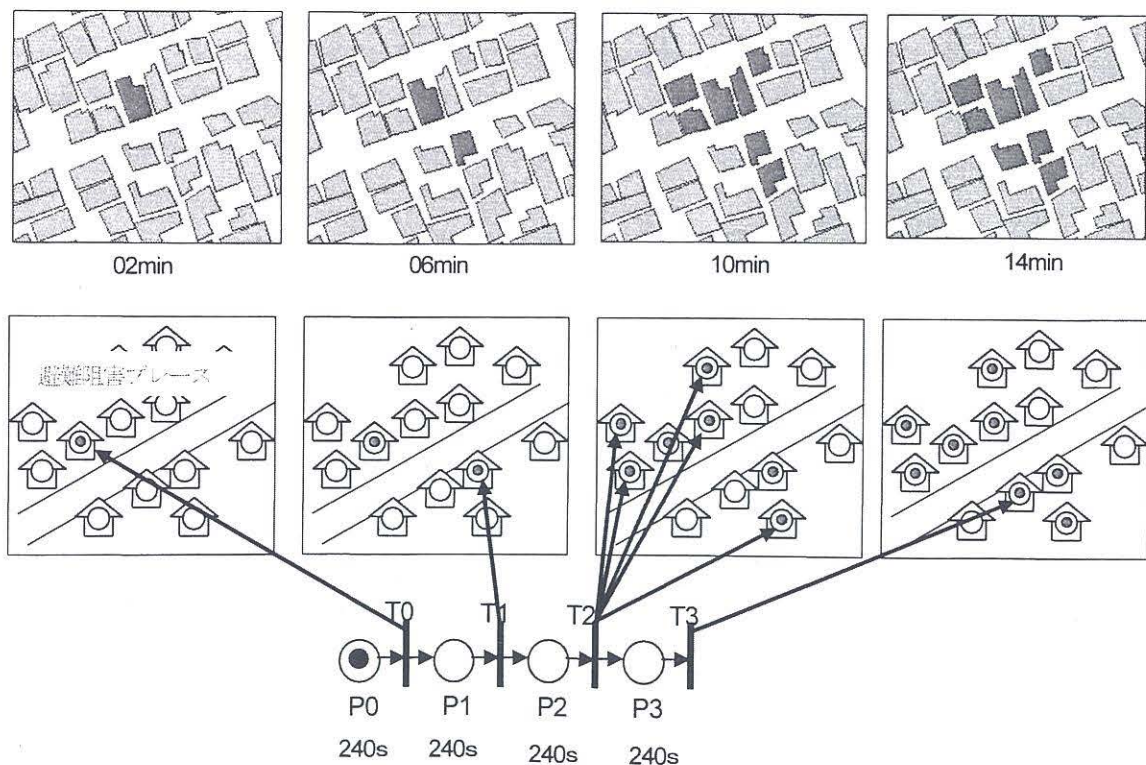


図 5-3-4(2) 火災延焼シミュレーションとの連動化

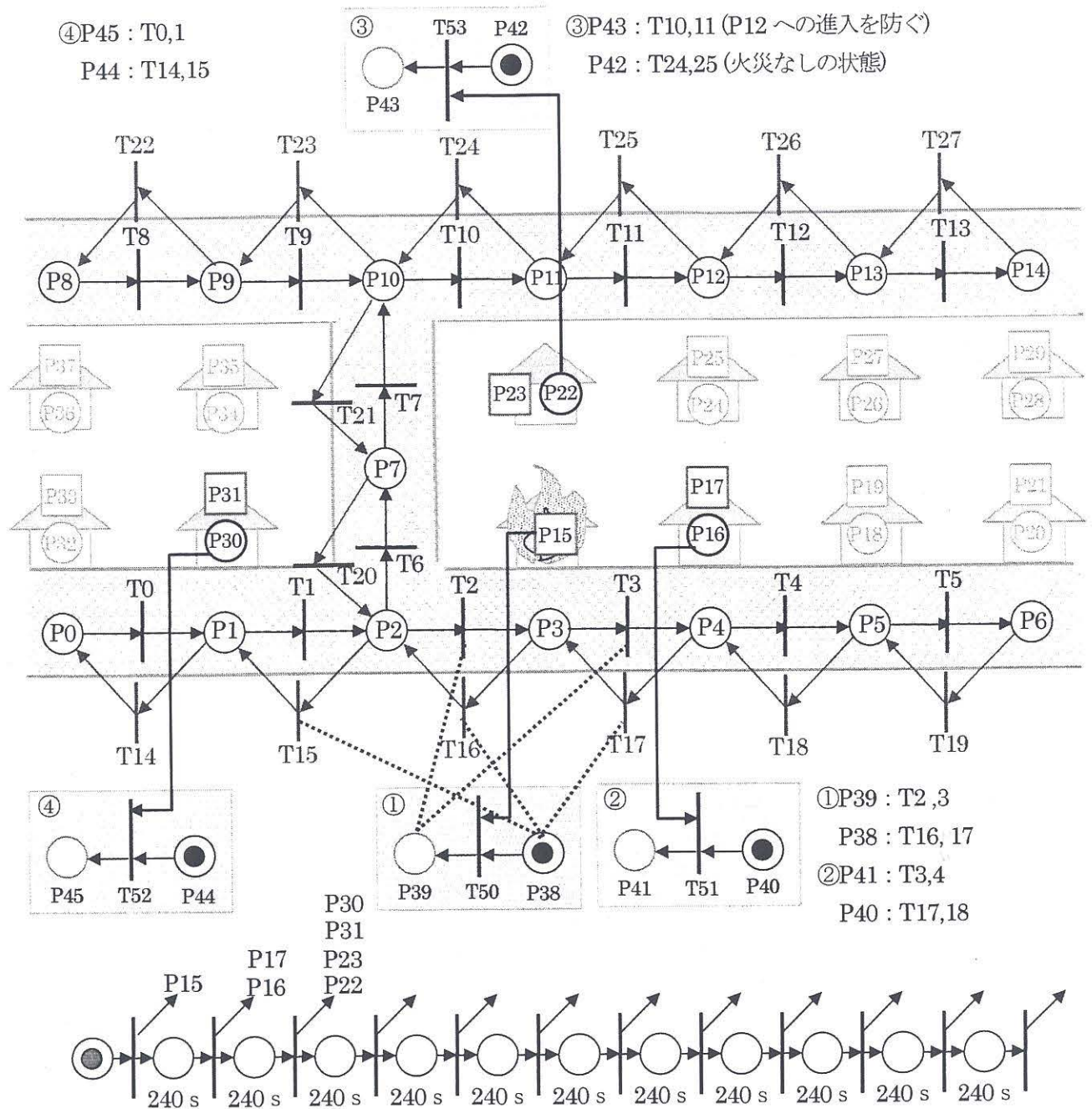


図 5-3-4(3) 火災避難阻害による経路変更モデル

火災延焼に伴って、この P7 に相当するものが避難経路沿いに発生していくことになる。図 5-3-4(2)は、上段に火災延焼シミュレーション結果による延焼拡大図を、下段に火災延焼シミュレーションの単位時間(4分)をタイマとする時間進行ネットを配置し、そして、この中段に、その模式図とともに阻害・抑止プレースの発生位置(トークンで指示)を示している。

上段の延焼図は、(1)の図 5-3-2 や図 5-3-3 で見たように、出火位置、風向、風速によって変化する。それらの想定シナリオの下で火災延焼シミュレーションを実行することで定まる。中段の阻害・抑止プレースの発生位置は、シミュレーションネットを構築する背景画像上で、火災延焼シミュレーション結果を参照することで、時間推移に沿って特定化できる。従って、それらの結果を用いて、Sdata 上で、下段の時間進行

ネットにおける各トランジションの出力プレースを登録していくことで、地震火災想定シナリオを、市街地避難のペトリネットに組み込みが可能となる。

図 5-3-4(3)は、これらを総合的に示したものである。下段の時間進行ペトリネットの各トランジションからの矢線先のリストが、延焼拡大に伴う阻害プレースである。ちなみに、建物上の□のプレースは、避難世帯の表示用で、○プレースが阻害発生プレースである。この図で P15 が□のプレースとなっているのは、この家屋を出火点としていることによる。

引き返しに伴う抑止アークについては、煩雑で見難くなるために、ここでは①の部分のみを表記してある。即ち、P15 にトークンが出力されることで、この地点での火災による切断型阻害の発生となり、非阻害時を示す P38 のトークンが消滅し、そこから掛けられていた引き返しのトランジション群への抑止が解除されるとともに、P39 に出力されたトークンによって、非阻害時の経路移動のトランジション T17 と T16 が抑止される。その結果、P2 まで避難してきた世帯は、T6 を発火させて左折するか、あるいは T15 を発火させて引き返すことになる。このような抑止の変更が、延焼進行に伴って阻害プレースにトークンが出力されることで行われるという形で、阻害地点の拡大化が組み入れられることになる。

5. 4 地震時市街地避難計画シナリオのシミュレーション実行

(1) 背景画像上での避難計画シナリオのペトリネット構築

5.2 と 5.3 では、地震時市街地避難計画シナリオに必要な部分ペトリネットの準備を行ってきた。本節では、金沢市東山地区での避難計画シナリオのペトリネットシミュレーションを行う。

まず、図 5-4-1(1)に、この地区のシミュレーションの基礎となる背景画像を示す。図に示すように、避難場所は2箇所あり、一つは町中の馬場小学校で、もう一つは小丘にある子来町緑地である。それらに向かう避難経路も示してある。

阻害シナリオについては、馬場小学校の近くに、建物倒壊による切断型阻害と火災による切断型阻害の想定が可能となるネット構成を行う。火災についてはもう1箇所、馬場小学校と子来町緑地の間に想定可能となるネット構成を行う。火災の発生位置は、図 5-3-2 に示した同時多発火災の延焼シミュレーション図の①と②の地点と同じものである。

図 5-4-1(2)が、この背景画像上で、5.2 の(3)で準備した経路移動部のペトリネット構築から出発し、5.2 の(2)の避難開始部、同(4)の阻害部のペトリネットを追加・構成し、上述したシナリオシミュレーションを目的に構成したシステムネットである。ここでは、シミュレータの表示・非表示メニューによるプレースのみの配置表示を行っている。

図 5-4-2(1)は、このシステムネットの拡大図である。まず、経路上のプレース(○)が避難世帯の移動プレースである。分岐・合流点には、矢線で示すように、避難場所である馬場小学校に向かう移動トランジションの方向付けを行っている。プレース(■)は、避難対象世帯の配置を示すもので、その脇の小さい○は、5.2 の(2)で準備した図 5-2-3(3)の避難開始部ペトリネットにおける情報伝達のプレースであり、初期トークン配置のプレースは、自主防災での責任世帯位置を示している。また、少し大きめで、初期トークン配置を持つ○プレースは、火災阻害発生の有無を示すものである。

図 5-4-2(2)は、このネットによるシミュレーション実行画面例を示したもので、まず、避難対象世帯を示すプレースで、■の表示のものは避難を開始していない世帯で、□の表示のものは、既に避難を開始し、路上へと出ている世帯である。避難開始は、災害情報の個別判断によるとした。このような出力画面によってこの想定がシミュレーションネットに反映されていることを確認することができるだろう。

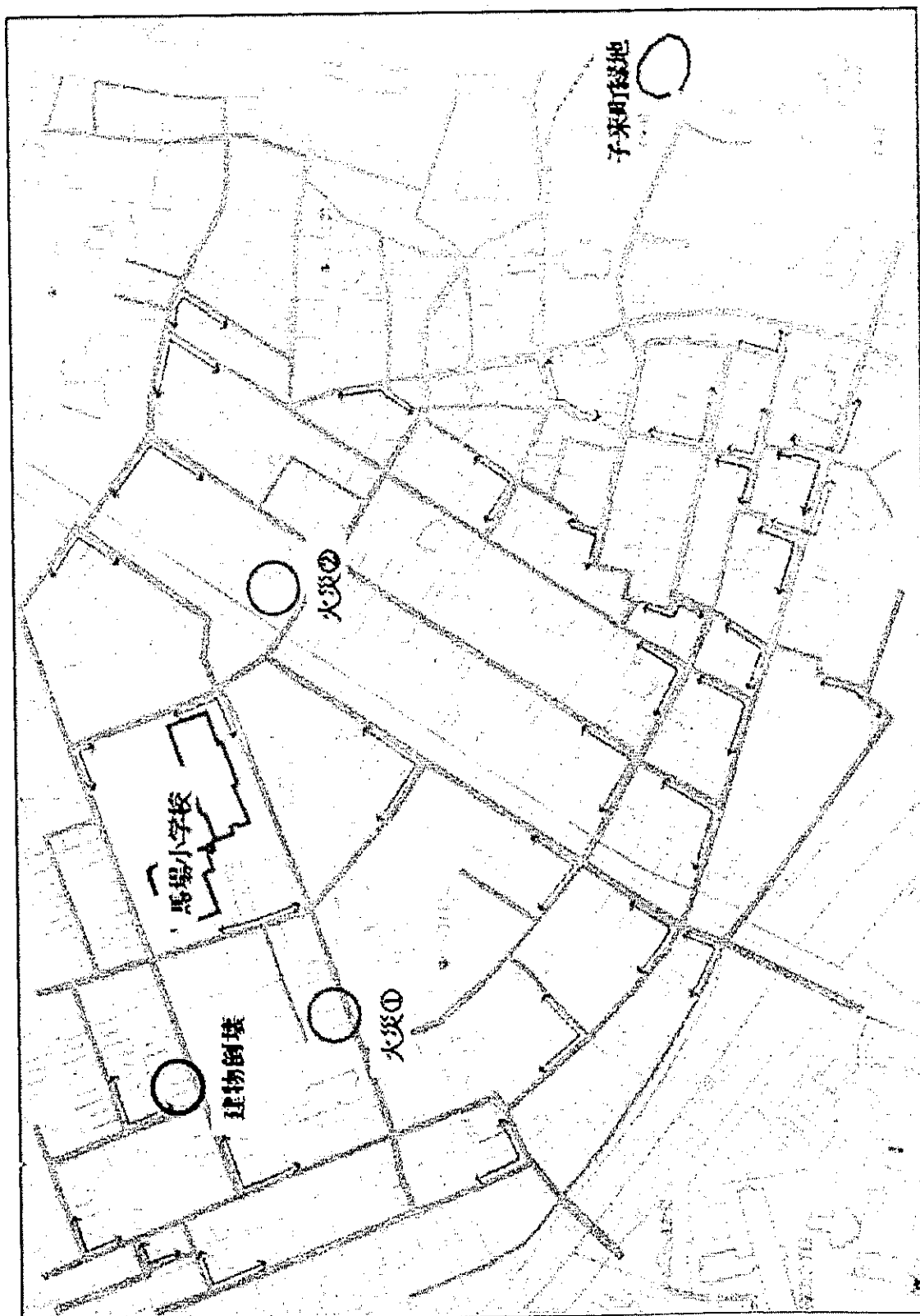


図 5-4-1 (1) 対象地域の背景画像と基本シナリオ想定

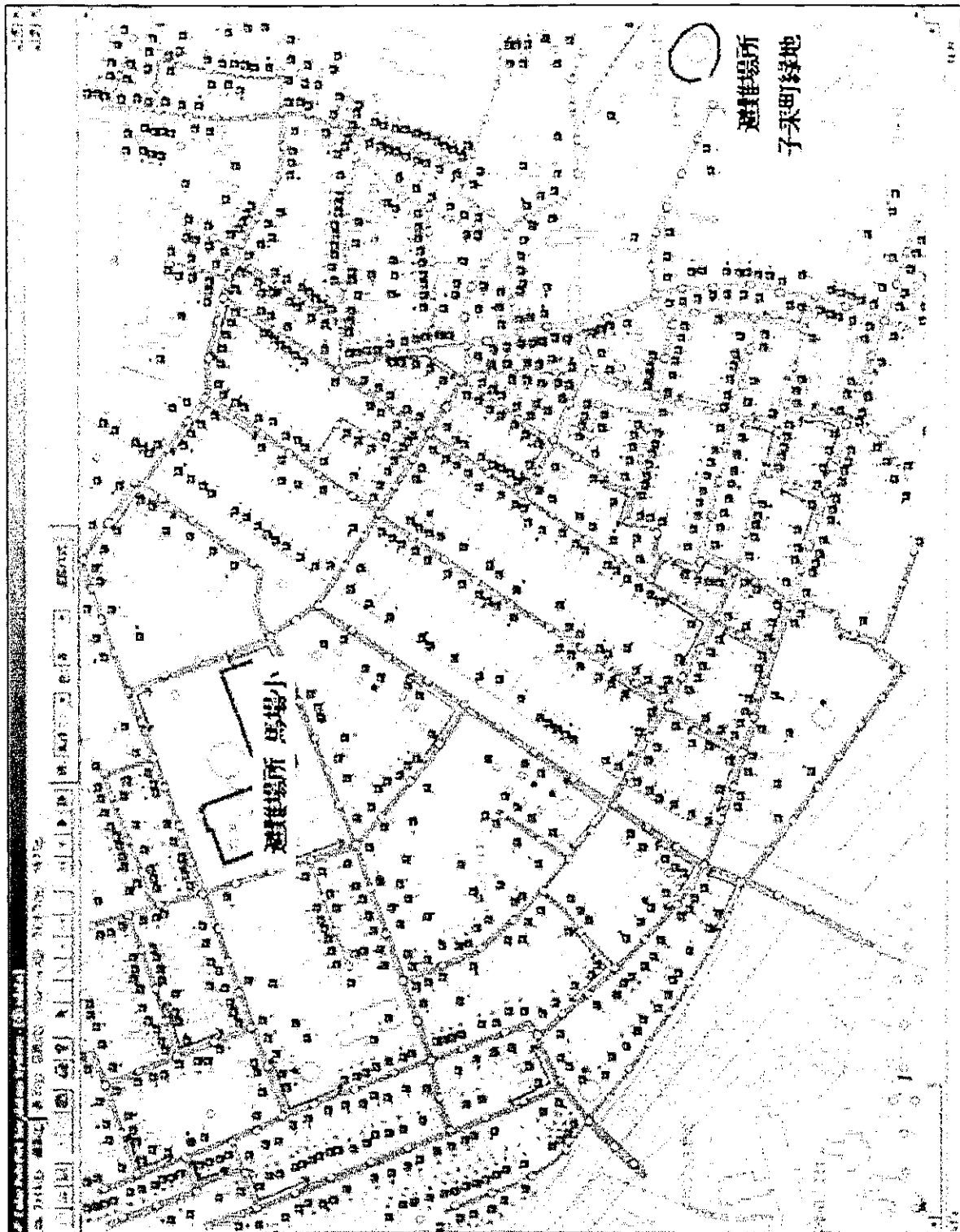


図5-4-1(2) 対象地域の避難計画シナリオのシミュレーションネット

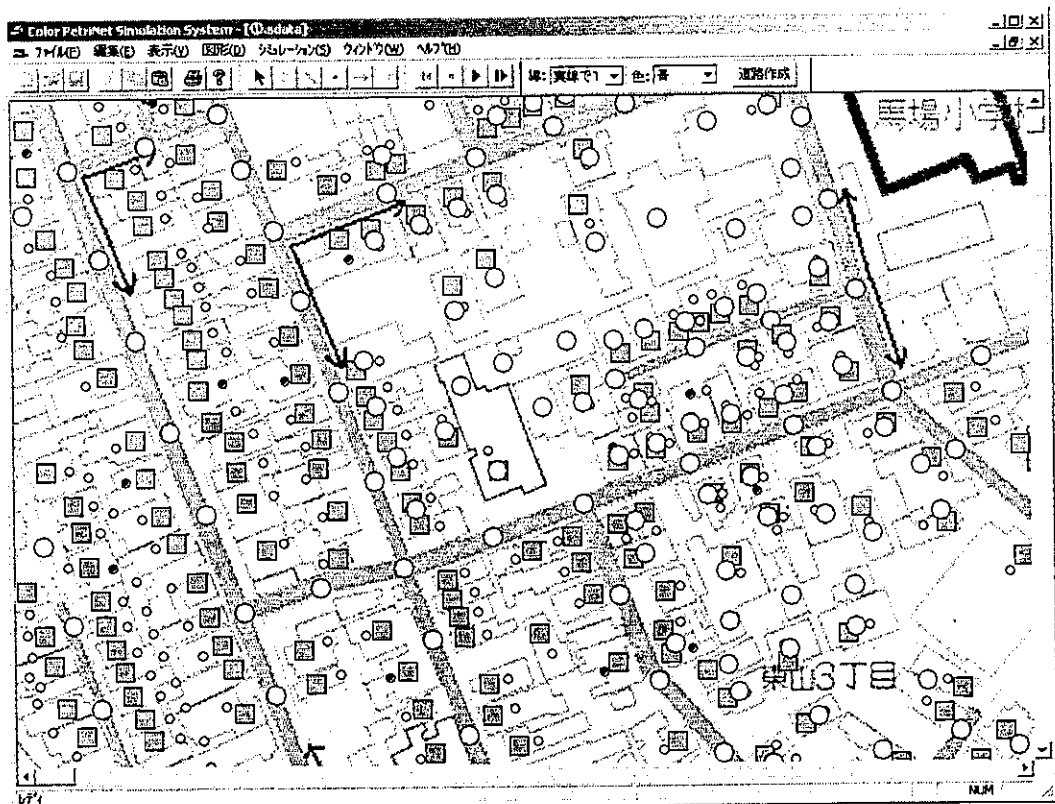


図 5-4-2(1) 分岐点想定と拡大画面

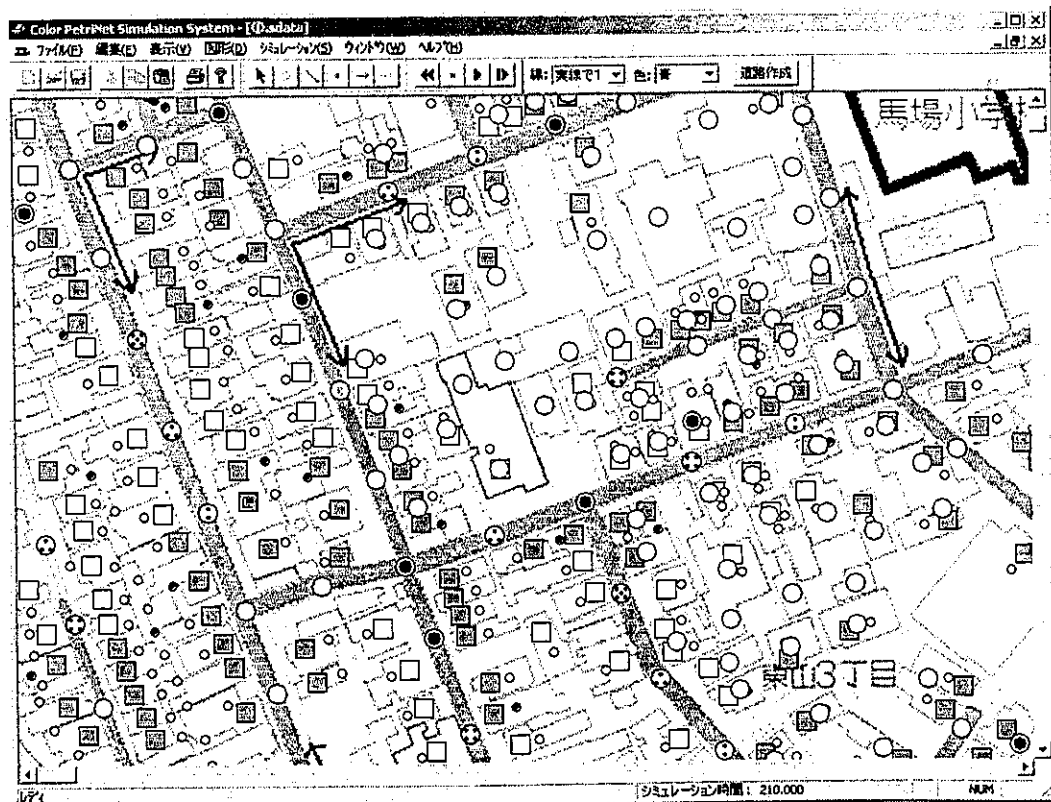


図 5-4-2(2) シミュレーション実行画面例

経路上のプレース(○)の中のトークンは、その地点を現在避難中の世帯の数を示すもので、表示スペースの関係で5世帯以上の場合には数字表記となる。画面左の分岐・合流点では5個のトークン表示が見られる。また、左方の経路上では、プレース内に6の数字が表示されているが、これが後者のケースである。この数値に制約がないとするのが、避難路の容量制約なしとするケースである。

(2) 避難計画シナリオのシミュレーション実行

このシステムネットを基に、地震時避難計画シナリオのシミュレーションを実行し、地震時避難計画およびその訓練における避難阻害要因の想定課題について検討する。

図5-4-1(1)に示した地域は、伝統的な町屋街で、木造建物も多く、地震時被害想定において、炎上・延焼火災の発生数が3以上とされており、避難計画の充実化が重要課題となっている。本項では、まず、この地域における地震時避難阻害として、図5-4-1(1)に示した位置で、1)建物倒壊による切断型阻害、2)①地点での火災による切断型阻害、および3)①と②地点での同時火災による切断型阻害の発生を想定する。

避難場所は、馬場小学校と子来町緑地の2箇所とし、住民は指定避難場所を知っているとする。この地域は基本的には平地であるが、東側は山地で、子来町緑地への入り口経路は登り坂となっており、移動プレースのタイムは、平地は0.8 m/s、傾斜地では0.5 m/sとして区別する。

避難開始は、自主防災組織での班長世帯が避難勧告情報を受けて判断し、班内世帯に伝達される形で行われるとする。遡巡確率と遡巡時間は共通とし、ここではそれぞれ50%と20秒としている。

図5-4-3に、<阻害なし><建物倒壊のみ><①地点での火災のみ>としたシミュレーション結果を示す。火災については、図5-3-2で想定した冬の昼で、北西の風、風速6 m/sの気象条件下での出火・炎上火災を考える。即ち、図5-3-3(2)に示す延焼拡大状況の組み入れをする。避難開始のタイミングは、火災発生から180秒後(炎上状態)としているが、この図では、避難開始時を原点とし、避難完了者の累積数の推移を比較する形で整理してある。

まず、図5-4-3(1)の馬場小学校への避難推移については、<阻害なし>と<建物倒壊のみ>では、避難完了時間にはほぼ差はなく、720秒、12分後に、635世帯の避難が完了するという結果となった。<地点①での火災のみ>では、完了時間は840秒となり、120秒遅くなっている。<建物倒壊>か<地点①での火災>かという阻害要因の差は、図に点線と1点破線で示す経過時間帯での差に出ている。即ち、1箇所の切断型阻害という面では共通しているが、<建物倒壊>による阻害がその地点の利用者に限定的であるのに対して、<火災>による阻害の場合は、延焼拡大に伴う阻害領域の変化により長引くことが示されている。

図5-4-3(2)の子来町緑地への避難推移については、いずれの阻害についてもその想定位置との関係で影響が出ないことが分かる。馬場小学校への避難世帯の総数が635であるのに対して、子来町緑地では340世帯となっている。これらが、当初想定した「指定避難場所は既知とする」としたことに対応する数値ということになる。

次に、図5-4-4(1)に<地点①と②での火災2箇所>と<建物倒壊と火災2箇所>の阻害シナリオの比較を示す。この場合には、馬場小学校への避難完了世帯の総数は595となり、地点①のみでの火災ケースと比較すると40世帯の減となる。図5-4-4(2)は、この減少分が子来町緑地へ避難していることが分かる。即ち、馬場小学校が指定避難場所であったが、避難路阻害に伴い引き返しにより避難先の変更が行われたことが分かる。また、阻害なしのシナリオでは720秒での避難完了とな

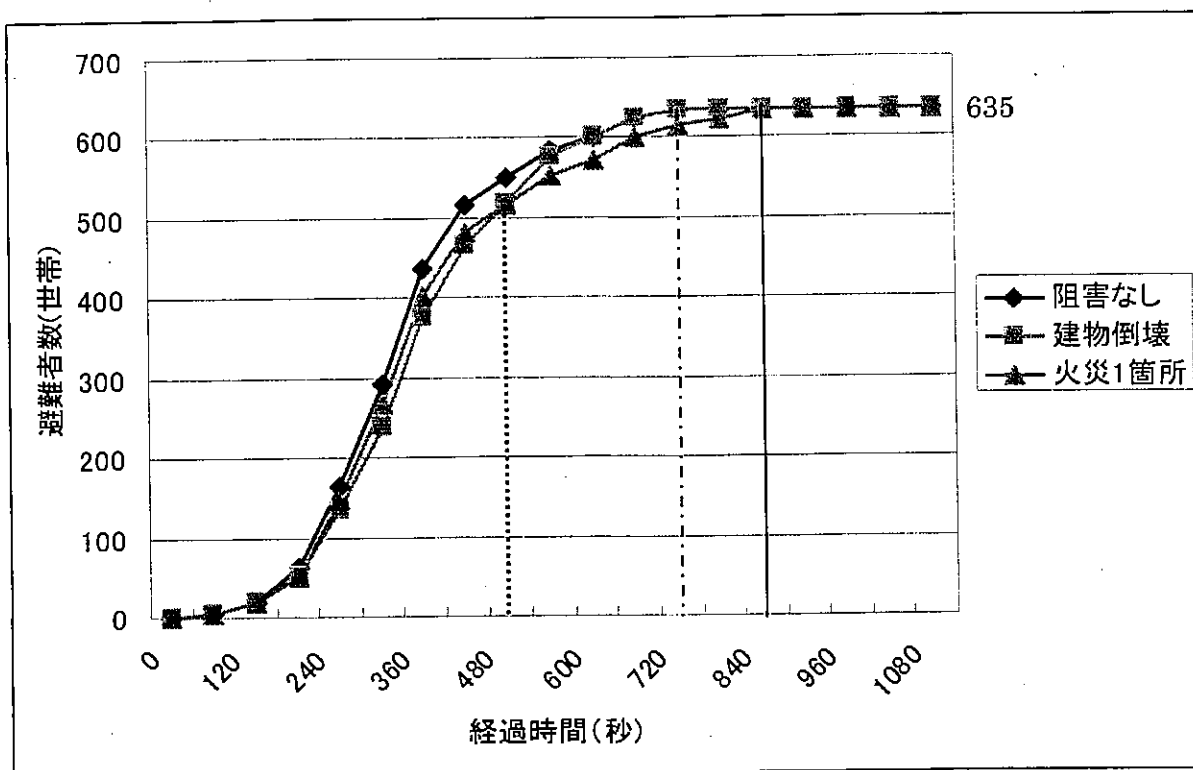


図 5-4-3(1) 馬場小学校における避難者数推移

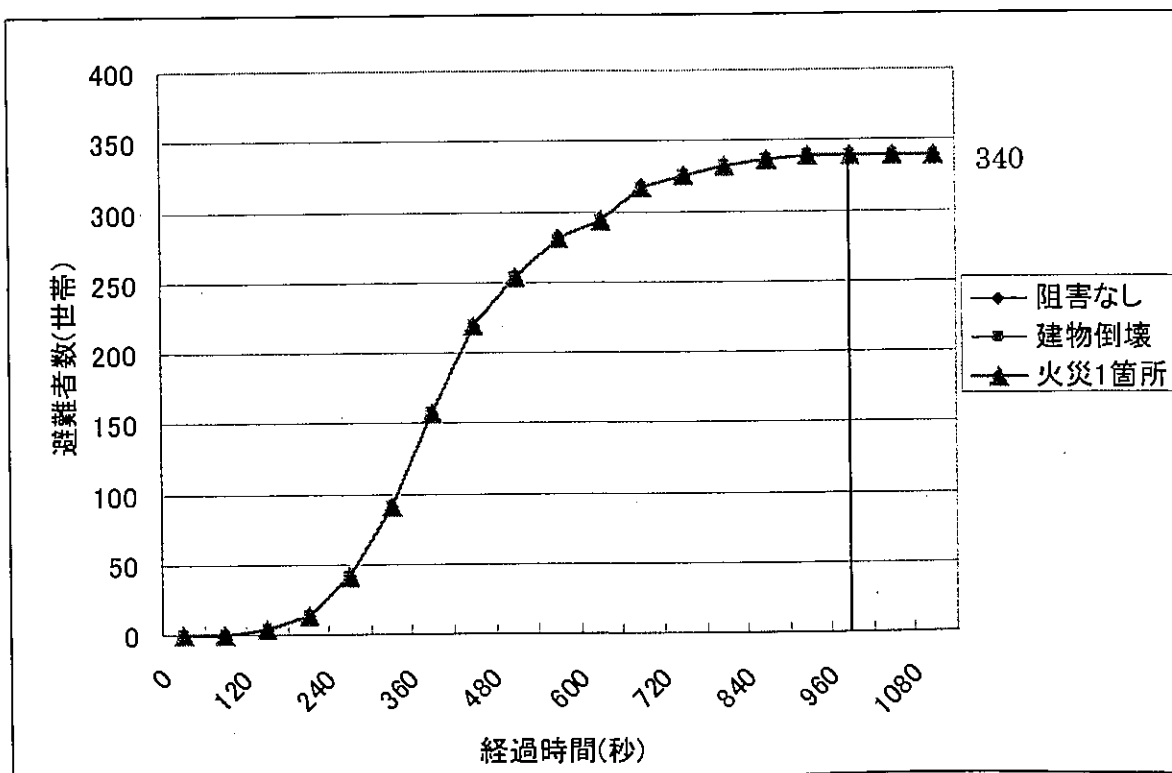


図 5-4-3(2) 子来町緑地における避難者数推移

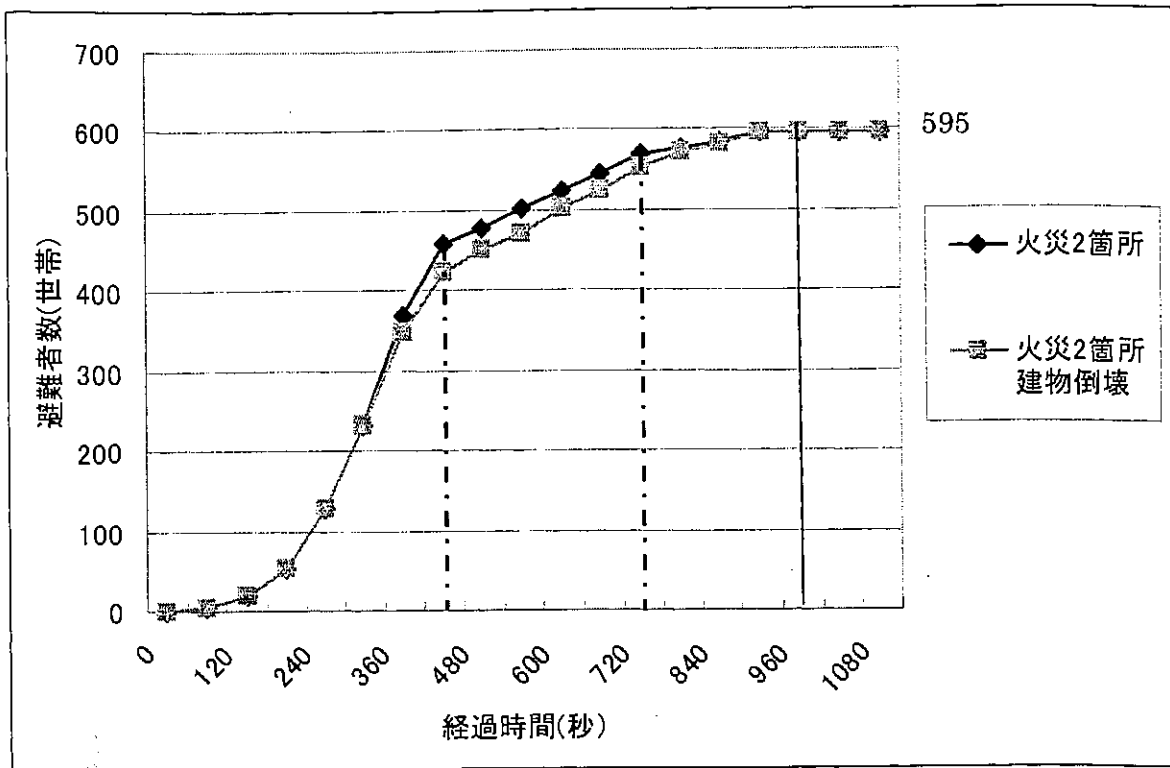


図 5-4-4(1) 馬場小学校における避難者数推移

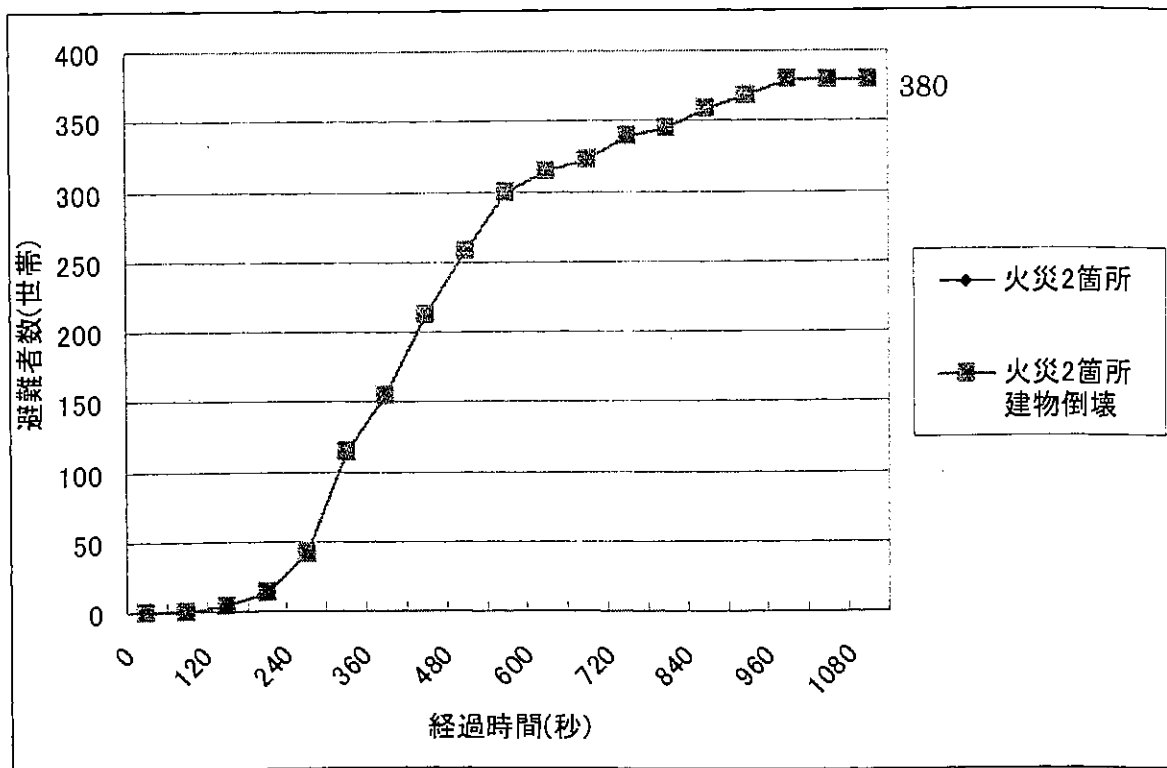


図 5-4-4(2) 子来町緑地における避難者数推移

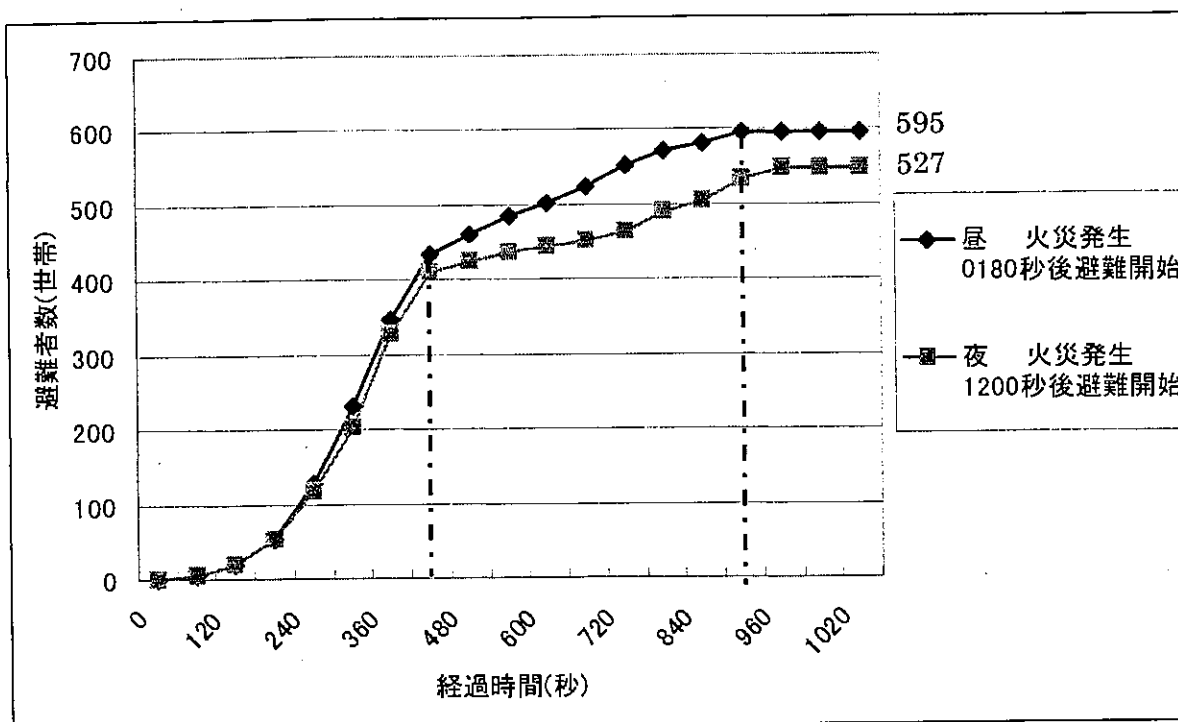


図 5-4-5 (1) 馬場小学校における避難者数推移

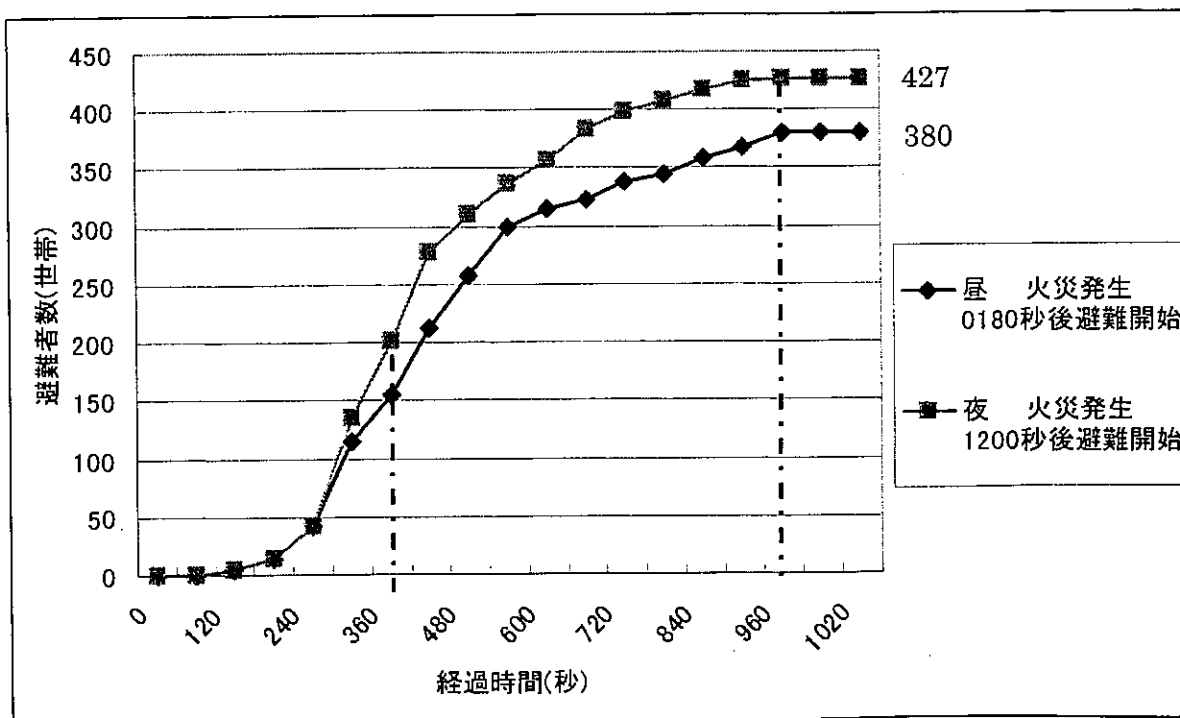


図 5-4-5 (2) 子来町緑地における避難者数推移

るところが、960 秒となり、2 分 20 秒の遅延となる。

図 5-4-5 では、地震の発生時間帯との関連でのシナリオ比較を行っている。今までのシナリオでは、火災延焼リスクの高い冬の昼の時間帯の地震火災を想定している。即ち、北西の風、風速 6 m/s で、市街地の中心に向かう延焼のために、避難阻害が長く続くケースである。それに対して、ここでは、南東の風、風速 5 m/s の夜の時間帯のケースを考える。延焼リスク自体は低くなるが、夜間のために避難開始時期が遅れる恐れがあるだろう。

そこで、図 5-4-5 のケースでは、阻害発生の数と場所は図 5-4-3 のケースと同じであるが、昼間の地震では避難開始が 180 秒後であるのに対して、夜間のケースでは 1200 秒、20 分後と遅れるとしてシミュレーションを実施した。図 5-4-5(1)より、馬場小学校への避難完了世帯の総数は 595 から 527 にさらに減少し、図 5-4-5(2)より、子来町緑地への避難完了世帯数が 427 に増加し、馬場小学校への避難阻害が一層大きくなることが分かる。より詳細に見れば、図 5-4-5(1)の 1 点破線間の時間帯では、馬場小学校への避難完了が進まず、図 5-4-5(2)の 1 点破線間の時間帯では、逆に急進していることが分かる。

これらのことより、地震時火災の同時多発性を考慮すれば、複数の避難場所を想定する計画が望ましいし、そのような避難訓練の企画も必要となる。現状の避難計画では、この地域においても、防災計画書での指定避難場所は馬場小学校となっている。子来町緑地は、公園課による指定に過ぎないが、減災という観点からの点検・構築支援が重要となるだろう

5. 5 あとがき

本章では、地震防災計画における減災対策計画として、消防防災システムと対をなす市街地避難計画の点検・構築支援に、本研究で提案している背景画像上でのペトリネット構築法の適用化を行った。まず、2 節において、市街地避難計画シナリオの点検・構築の基礎となる基本構成図を示し、そのペトリネットシミュレーション展開に必要な基本部分のペトリネットを、〈避難開始部〉〈経路移動部〉〈地震時阻害要因部〉に分けて整備を行った。3 節では、わが国での地震において特に問題となる火災発生とその延焼について、そのシナリオシミュレーションへの組み入れ法について検討した。ここでは、火災延焼シミュレーションとの連動化によって、同時多発性、地震発生時の気象条件の反映化を可能とした。

4 節では、金沢市の東山地区を対象地域とし、その地図画像を背景画像とし、その上で、建物倒壊による切断型阻害、2 地点での火災延焼による切断型阻害を考慮したシナリオシミュレーションが可能となるシステムネットの構築を行った。そして、このシステムネットでの初期トークン配置と同タイマ設定の変更により、視覚型の出力画面を持つシミュレーションの即時実行性を示すとともに、解析項目の設定による数値結果を求めた。

阻害なしの避難シナリオでは、馬場小学校に 635 世帯が 720 秒で、子来町緑地には 340 世帯が 960 秒で避難を完了する。建物倒壊ないしは火災阻害が、馬場小学校近辺で 1 件発生する避難シナリオでは、馬場小学校への避難完了が 120 秒遅くなるという影響が出た。火災がもう 1 件、馬場小学校近辺ではあるが、子来町緑地側で発生するという避難シナリオでは、馬場小学校への避難世帯は 40 世帯減り、595 世帯となり、避難完了時間は 960 秒になり、子来町緑地には 380 世帯が避難するという結果となり、火災阻害による影響が大きく出ることが分かる。

さらに、この点検では、地震の発生時期と時間帯シナリオの取り込みをも行った。火災延焼シミ

ュレーションとの連動化で、まず、地震の発生時期と時間帯の風向・風速を反映した延焼拡大結果を用いて、火災延焼に伴う阻害地点の拡大化のシナリオペトリネットの構成が可能となる。もう一点は、地震発生時間帯が昼間か夜間かの影響を、災害の認知性、生活リズム性との関連で、避難開始時期シナリオとして取り込むことが可能となる。この点検例として、冬の昼と夜の比較をおこなった。前者の気象条件は南東の風、風速 6 m/s で、後者は北西の風、風速 5 m/s で、この地域での避難阻害リスクとしては前者の方が高くなる。一方、避難開始は前者の方が早いとして避難シナリオを作成し、シミュレーションを行った。その結果、夜間の避難開始の遅れに伴う火災延焼阻害が増大し、馬場小学校への避難世帯はさらに減少し、子来町緑地への避難にシフトすることが示された。

地震時避難計画では、火災発生 of 想定が重要な要素となる。本研究では、この点に関する点検を、ペトリネットを使用した視覚的なシミュレーションで行うことで、より明瞭に示すことが出来た。今後の課題としては、基本諸パラメータの実証、避難パターンに関する住民意見の反映化、阻害シナリオのより現実的な設定等があるが、基本形についてはかなり整備できたのではないかと考えている。

5. 6 参考文献

- 1) 木俣昇：大震時火災の延焼シミュレーション・システムの開発について、金沢大学工学部紀要, 15 巻 2 号, 125-138, 1982.
- 2) 木俣昇：大震時避難計画のためのメッシュ型火災延焼シミュレーション・システムに関する検証, JORSJ, Vol.30, No.1 59-86, 1987.
- 3) 木俣昇, 二神透：大震時火災の延焼シミュレーション・システムの要因分析による都市の耐火構造の研究, 土木計画学研究・論文集, No.5, 123-130, 1987.
- 4) 木俣昇, 二神透：防災緑地網整備計画のための火災延焼シミュレーション・システムの開発, 土木学会論文集, No.449/IV-17, 193-202, 1992.
- 5) 二神透, 木俣昇：倒壊建物と炎上車両を考慮した地震火災危険分析, 土木計画学研究・論文集, No. 21, 341-348, 2004.
- 6) 木俣昇, 高木秀彰, 黒川浩嗣：ペトリネットによる交通流シミュレーションシステムの開発, 土木計画学研究・論文集, No.12, 691-699, 1995.
- 7) 木俣昇, 鷺見育男：消防防災システムの阻害要因のペトリネットシミュレーションに関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No.14, 393-400, 1997.
- 8) 木俣昇, 中村彰彦：交通流ペトリネットシミュレータにおける背景画像上でのデータベース化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, 51-62, 2004.
- 9) 木俣昇, 曾根岳志：ペトリネットによる背景画像上での建物避難シナリオのシミュレーション研究, 土木計画学研究 土木計画学研究・論文集, Vol.22, 2005.10, 53-64
- 10) 堀浩三, 木俣昇：ペトリネットシミュレータによる背景画像上での地震時緊急路の点検・構築支援システム, 土木計画学研究・講演集, 32 巻(CD-ROM 版) No.40, 2005.12.

第6章 ペトリネットシミュレータを用いた中山間地域の避難計画支援に関する研究

6. 1 まえがき

2004年に相次いだ台風や集中豪雨、新潟中越地震による人的被害についての共通課題は、災害弱者の避難の問題である。これらを受けて、先般、国は、高齢者や障害者といった要援護者の避難を考慮した、「避難準備情報」を新たに創設した。この目的は、避難に時間がかかる要援護者への準備を促し、要援護者が的確に、避難勧告、避難指示へ対応できるよう配慮したことにある。しかし、過度な個人情報保護の意識のため、だれが責任を持ってどのように要援護者を災害時に支援するのかなど、多くの課題を抱えている。従来、避難計画は防災計画の中で、ハードな対策を補完する立場であった。しかし、近年の災害の発生特徴である、いっどこで発生するかもしれない局所的豪雨に伴う土砂災害や、空白地域での地震災害など、従来のハード対策では対応不可能であり、改めて、人命の確保を第一とする避難計画の重要性が認識されているといえよう。避難に関する研究は、従来より、多くの研究がなされている^{1)~4)}。それらの多くは、対象が市街地であり、市民を災害から直接守る、あるいは、一次的に避難することにより災害リスクを軽減するための経路や、避難行動を記述する研究が行われている。南ら⁵⁾は、津波を対象として、避難路の地形データに着目し、測量による正確な高度情報に基づく避難計画を提案している。最近では、シミュレータを開発することにより、さまざまなシナリオを想定した、避難計画の評価研究も行われている。

本研究の特徴は、中山間地域といった、これまで注目されていなかった地域に着目し、地形・道路形態といった避難に大きく影響を与える要因に着目し、個々人に着目した互助型避難計画を支援を目的としている。そのために、避難シミュレータを開発し、行政・専門化・住民が一体となった避難計画の支援を目的に研究を行っている^{7)~9)}。

中山間地域は、高齢化が進み、独居世帯率も高く、避難のための移動経路・移動手段が、地形条件等に制約され、経路が限定されているため、災害発生にともない孤立あるいは、迂回路を強いられるような地域特性を持つ。著者らはこれまでに、対象地域の住宅・道路・地形のデータベース化を行い、プローブデータを用いて、車・徒歩といった移動手段別避難時間や、阻害が発生し道路が通行不可能になった場合の避難時間等の評価を行ってきた。しかし、プローブデータとペトリネットの入力系が必ずしもシステム化されていなかったため、シミュレータの実行までの処理に時間を要した。今後、シミュレータを合意形成のためのツールとして活用するためには、プローブデータとペトリネット間の入力系のシステム化による基本ネットの作成のシステム化や、背景画像との連携によるインターフェイスの操作性を高める必要がある。

もう一点は、避難形態に互助避難を想定し、要援護者を対象とした駆けつけ部分ネットを提案し、基本避難シナリオに、サブネットを結合することによるペトリネット・シミュレータの操作性・拡張性について考察したいと考えている。

最後に適用事例では、シミュレータを用いて行政・住民ベースによる避難シナリオを想定し、それぞれの評価について考察するとともに今後の課題を整理する。

6. 2 ペトリネットによる避難シミュレーションの概説

(1) ペトリネットの基本概念

ペトリネットとは、図-6-2-1に示すように、プレース (○) とトランジション (|)、アーク (入出力: →、抑止: …→) を要素とする、グラフ形式による対象系の記述をいう。図-6-2-1は、t1からなるトラン

トランジション（基本事象）である。このトランジションへの入力プレースには、トークン（●）が打たれている。
 p_1, p_2 は、入力条件を表している。一方、 p_3 のプレースは、トランジション t_1 に、破線の矢印が引かれている。
 この、 p_3 のトークンは、入力条件 p_1, p_2 への抑止条件となっている。このように、事象を入力条件、
 抑止で表し、事象の推移は、トランジションが発火することにより、 p_4, p_5 の出力状態へ推移する。

図-6-2-2 は、避難者が自宅から避難路へ避難を開始するネットを表している。避難者は、行政からの避難の指示あるいは、住民同士の駆けつけといった互助により、避難を開始する。図-6-2-3 は、避難路の移動にプレースタイマを与えトランジションの発火ルールにより避難経路上の移動を記述している。

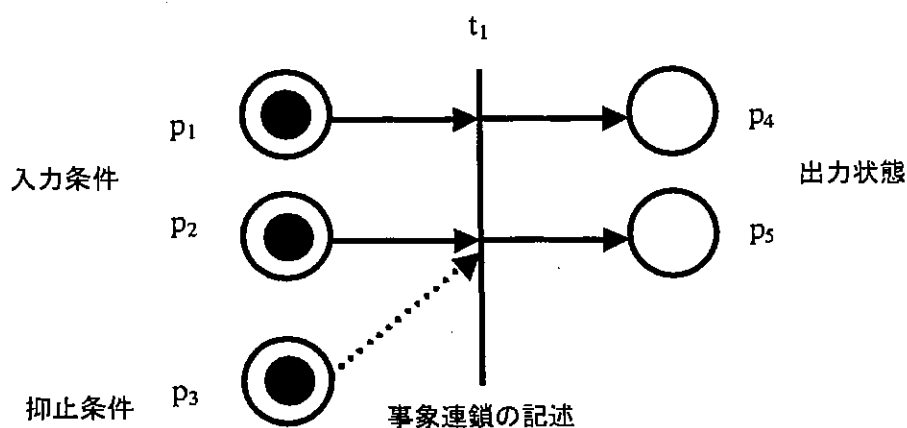


図-6-2-1 ペトリネットの基本モデル

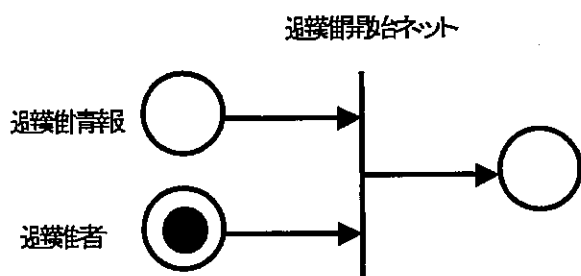


図-6-2-2 避難開始ネット

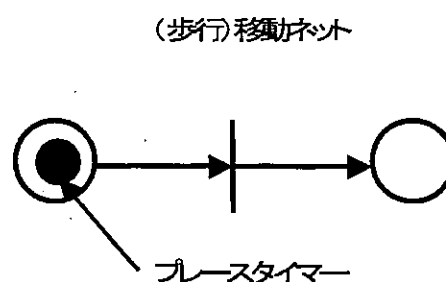


図-6-2-3 歩行移動ネット

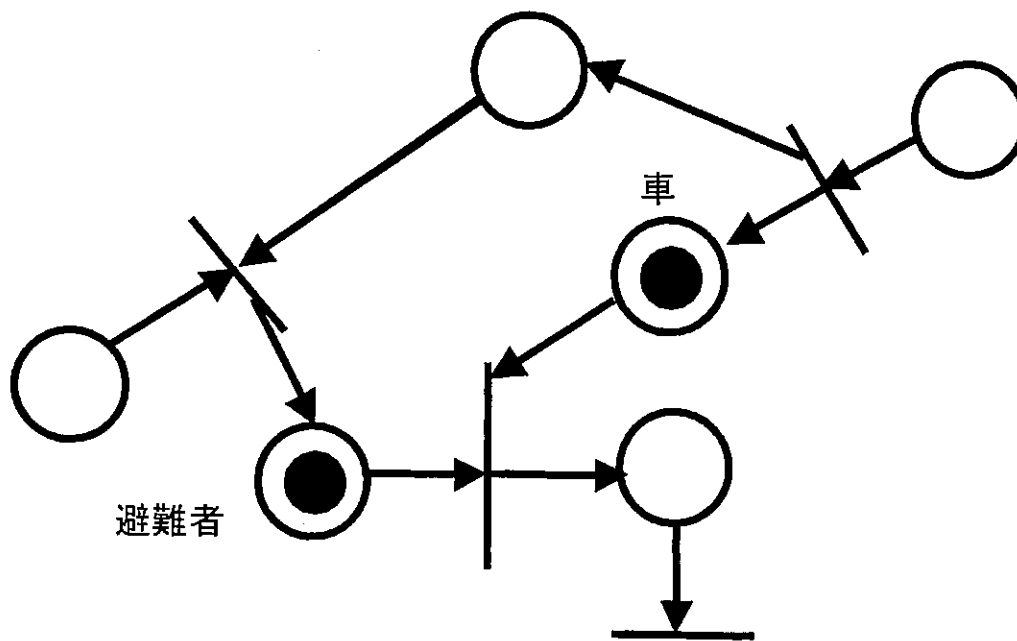


図-6-2-4 要援護者のための駆けつけネット

(2) シナリオシミュレータのための基本ネット

中山間の避難シナリオを考える場合、開始、移動、分岐、合流、互助、引返し、阻害といった部分ネットを考える必要がある。中山間地域の避難シナリオとは、これらの部分ネットの結合により構成され、ペトリネットの結合化は、シナリオの拡大化、精緻化を担保し、この特徴が、ペトリネットシナリオによる課題解決型の支援システムとしての実効性・有効性を保証している。ここで、基本となる部分ネットについて述べる。図-6-2-1、-6-2-2 は、避難開始ネットと歩行移動ネットを表している。右のトークンで示される避難者は、避難情報を入力条件として、移動を開始することになる。このときの、空間事象の時間移動は、右図のプレースタイマを与えることにより、プレースタイマが消費され、トランジションの発火に伴い、出力状態へトークンが移動することによって記述される。避難情報についても、部分ネットを構築することにより、事象を精緻化できる。図-6-2-4 は、高齢化が進む中山間地域に見られる、な独居老人世帯の歩行困難避難者を、用援護担当者が駆けつけて互助的に避難する駆けつけ互助ネットを表している。

(3) 災害シナリオのための基礎情報

一般的に中山間地域は、広大な地域に集落単位で人口が分散している。道路形状は、幹線道路から集落へ枝上に分布し、自動車が進入できない細街路が多数存在する。都市部の道路形状と大きく異なる点は、山間地のため道路勾配による移動への影響を受けることにある。一方、避難施設・救援施設は限定的かつ地形的制約を受けるため、都市部における避難・救援とは状況が大きく異なる。つぎに、中山間地域の災害特性に着目すると、前述したように、豪雨・地震による土砂災害が対象となる。

土砂災害とは、

- 1) 土石流危険渓流
- 2) 地すべり危険箇所

3) 急傾斜地崩壊危険箇所

に分類され、愛媛県では、1) 5,877箇所、2) 506箇所、3) 8,807箇所、合計15,190箇所が指定されている。しかし、これらの箇所は、現在までの調査によって把握された箇所であり、必ずしもそれら以外の箇所が安全であるとは限らない。また、土砂災害を引き起こす災害の外的圧力も種々あり、災害の様相も異なる。例えば、豪雨時には、すべての種類の土砂災害のリスクが高いといえよう。一方、地震時には、2)、3)のリスク発生の可能性が高いといえよう。これらのリスクによる被害の様相は、豪雨の程度や、地震動の強さによっても当然異なってくる。もちろん、最悪のシナリオとして、豪雨時・地震といった状況も想定されよう。シナリオ・シミュレーションの適用については、6.4節の適用事例にて概説する。

6.3 避難経路ネット図のプローブデータによる自動作成

(1) 避難経路のプローブデータ収集システム

著者らは、中山間地域の避難計画を策定するための基礎データとして、道路ネットワークのプローブビークルを用いて採取している。プローブビークルから得られる、1秒毎の緯度経度、海拔高度のデータと、徒歩専用道路については、携帯GPSを用いて徒歩による2秒毎の緯度経度、海拔高度を採取している。図-6-3-1にプローブデータで採取した、愛媛県久万高原長柳谷中津地区の道路ネットワークを示す。この図より、道路ネットワークが、東西1,700m、南北1,000m、標高390mから630mと240mの高度差を持つことが分かる。換言すれば、中山間地域では、この地形的特性を避難計画に反映することが肝要となる。

(2) 避難経路図データの策定システム

住宅・避難経路をペトリネットを用いて記述するためには、経路と施設のトポロジーや、住民の初期位置が必要となる。プローブデータは、自動車や携帯GPSを用いて民家の庭先あるいは軒先まで計測している

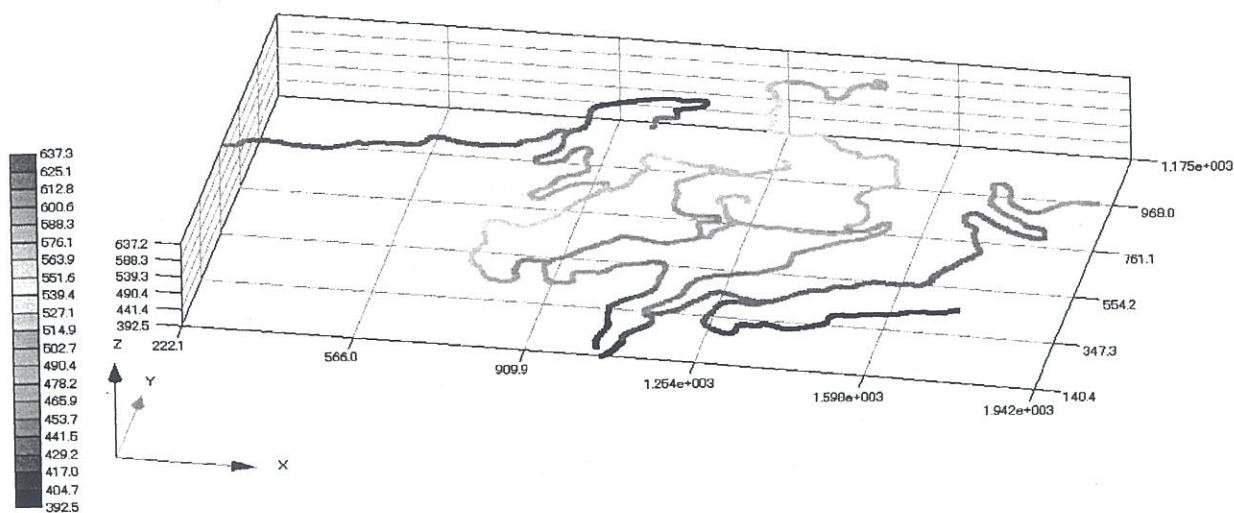


図-6-3-1 プローブデータの3次元表示

ため、これらのデータを用いれば、基本的な施設・避難経路のネットワークが作成可能である。移動手段が車の場合、プローブデータの1秒毎の移動時間から容易に任意の2点間の時間が求まる。しかし、歩行時間については、歩行専用道路の携帯GPSデータはあるが、その他の区間については、データを収集していない。そこで、著者らの道路勾配をパラメータとする経験式を用いて、歩行(上り、下り)の移動時間を算定している。この点についても、ネットワークの区間(ペトリネットにおけるプレースの位置と区間)が与えられれば、自動的に車による移動時間、徒歩上り下り移動時間が算定できるように、入力データのシステム化を図る必要がある。そのためには、道路の形状や勾配を考慮して、システムティックにプレースを配置する入力系の整備を行う必要がある。

図-6-3-2に、開発したペトリネット入力系システムフローを示す。プローブ情報の緯度・経度・高度情報を抽出し、図化することにより、施設・交差点を抽出し、これらをノードとするリンクを全て抽出する。つぎに、個々のリンクの勾配情報・道路形態情報を図化し、道路の形状・勾配を視察しながらプレースを配置する。任意のリンクにおける作業が終了すると、ペトリネットに必要な、車の移動時間、上り下りの徒

歩時間といったプレースタイマが自動的に生成される。そして、ペトリネットで使用する背景地図座標と緯度経度の変換を行えば、シミュレータ上のプレース位置情報を記述した、Ndataが作成される。このとき、トランジションの座標も必要になるが、プレースの midpoint を与えれば、基本的なペトリネットの空間は位置情報であるNdataが自動的に作成される。このとき、プレース、トランジションの事象の記述を、Sdataで記述する。例えば、合流や、分岐選択、駆けつけなどの部分ネットを結合することになる。全てのリンクデータにプレースを配置した後、背景画像座標への画像マッチングを行うと、車両、徒歩(上り下り)のプレー

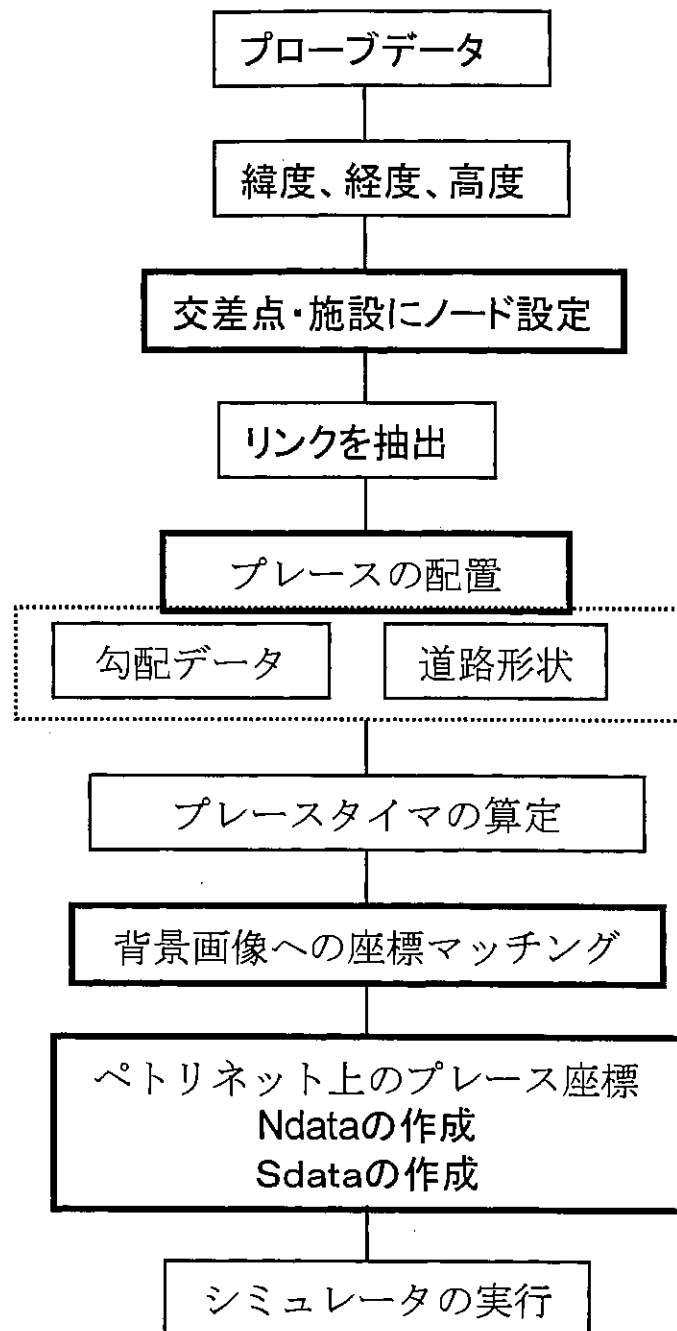


図-6-3-2 ペトリネット入力系システムフロー

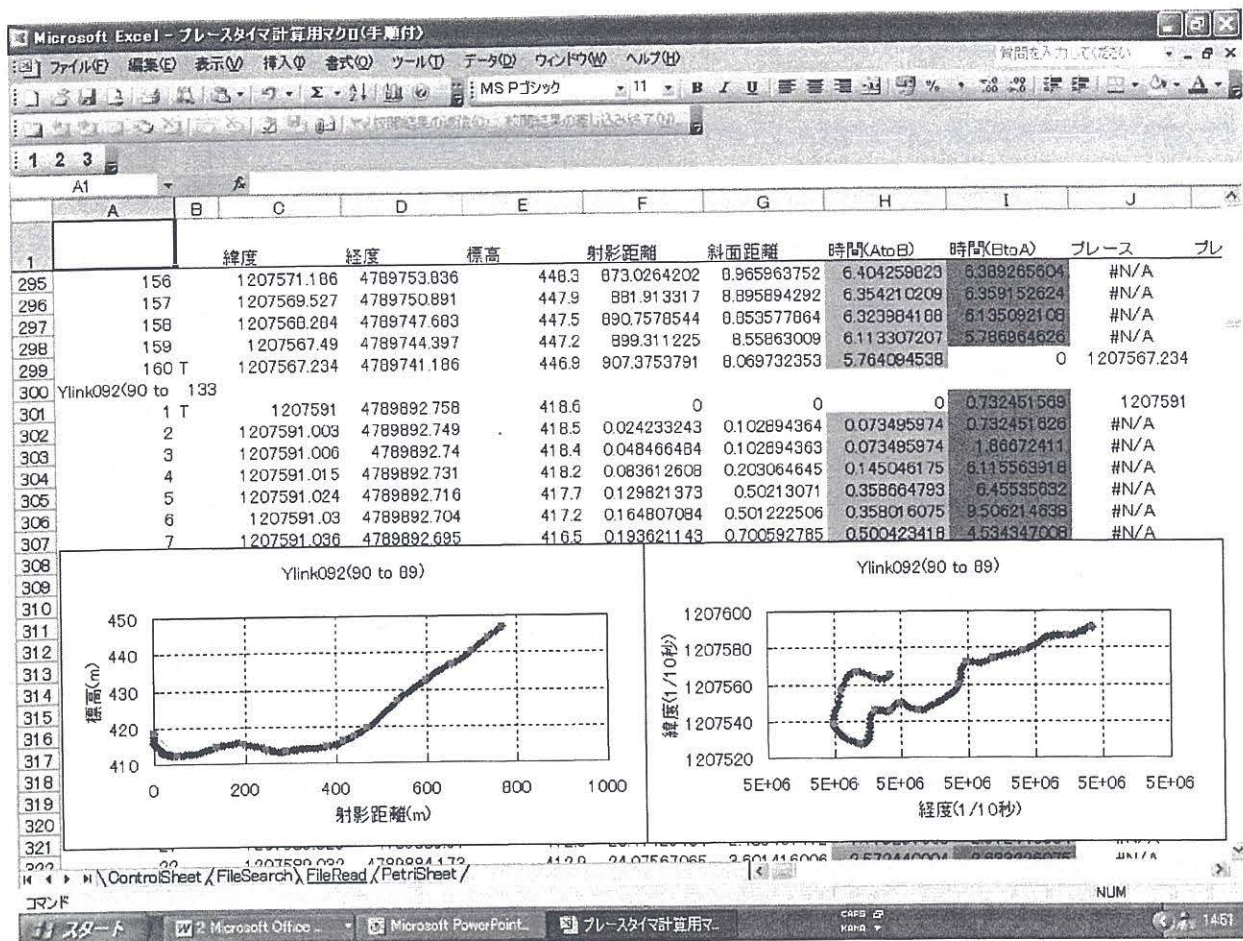


図-6-3-3 ペトリネットのためのプレース配置とタイマの算定

スタイマが自動的に策定される。そして、ペトリネットに必要なSdata, Ndataを同時に作成すると、シミュレータ用実行形式ファイルが作成できる。

図-6-3-3に、リンクNo. 92の勾配表示と、道路形態表示例を示す。この事例では、道路形態に着目して、プレースを配置した後、左の道路勾配が等しい区間にプレースを配置する。これらの作業が終了すると、移動手段別プレースタイマが計算される。図-6-3-4は、図-6-3-3で作成した、住宅から学校（避難場所）をリンクとした場合に、プレースの配置と、ペトリネット・シミュレータによるトランジションの配置、阻害（抑止）の配置事例を示す。図-6-3-2に示したように、プレースの緯度経度は、座標変換されて背景画像に対応した位置に自動的に配置される。換言すれば、プローブデータの緯度・経度・高度を採取すれば、即時にペトリネットのプレースの配置と、背景画像への反映が可能となり、代替案の提示や拡張化の即時性に大きく寄与することになる。

6. 4 中山間地域避難計画支援への適用研究

(1) 住民アンケートによるシナリオ想定

住民の意見を避難計画に反映させるために、2005年9月に住民アンケート調査を実施した。本論文では、ア

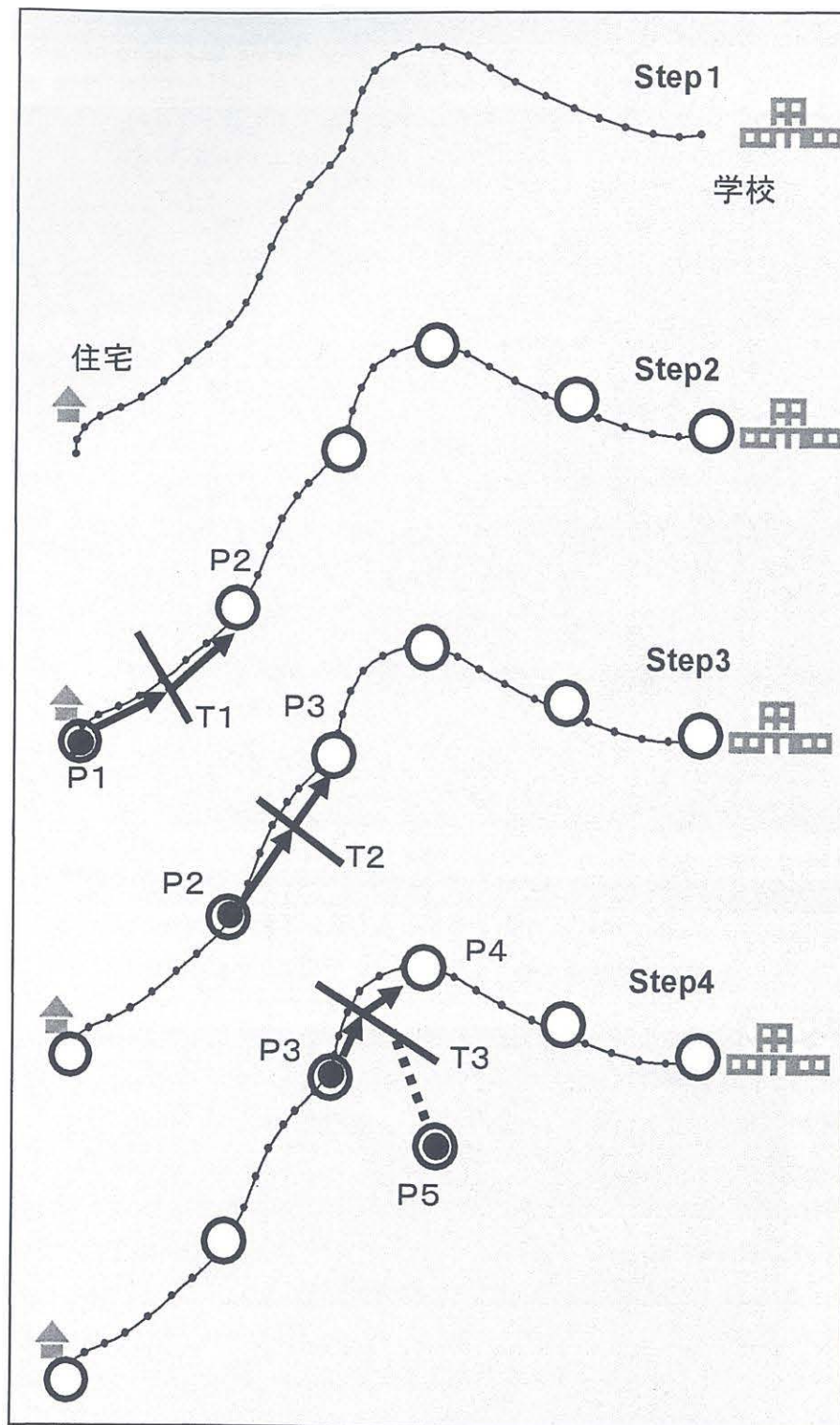


図-6-3-4 道路形状・勾配を考慮したプレースの配置



図-6-4-1 ペトリネット入力系システムフロー

アンケートの詳細については割愛するが、住民に避難経路や阻害となりそうな危険箇所の抽出を行っていただいた。アンケートによれば、災害時に避難しないという人が16.3%という結果となっている。主な理由は、避難場所が遠く移動中に災害に巻き込まれる可能性が高い、避難場所が土砂危険渓流に近く、自宅のほうが安全という意見があった。

図-6-4-1は、西村地区住民のアンケート記入による、避難経路の記入例である。この記入例より、著者らが把握していなかった、徒歩専用の経路が明らかになった。そこで、携帯GPSを用いて新たな徒歩ネットのデータを採取し、6.3(2)の避難経路図データの策定システムで説明した、ペトリネット入力系システムを用いた新たな徒歩避難ネットを追加した。図-6-4-2は、新たにアンケートで明らかになった、6つの徒歩経路を追加した、ペトリネットシミュレータと背景画像である。実線は、著者らが作成した避難経路である。実線上の白丸は、ペトリネットのプレースを、実線近くの四角は、住宅を表しており、四角の中の黒丸は、世帯人数を表している。本適用事例では、避難阻害がなく、画面下の小学校を避難場所として、住民が一斉に避難する事例を、追加ネットの有無について比較する。本節では、アンケートによる住民の避難経路を再現することによる、避難シミュレータを実行した。

図-6-4-3より、比較追加経路を使わない場合の収容完了時間は、28分、一方、使用した場合は16分で全員の避難が完了していることがわかる。しかし、収容率に着目すると、いずれのケースも14分で90%近くの住民が避難完了しているため、避難所から遠く離れた人の収容時間が大きく改善されていることがわかる。

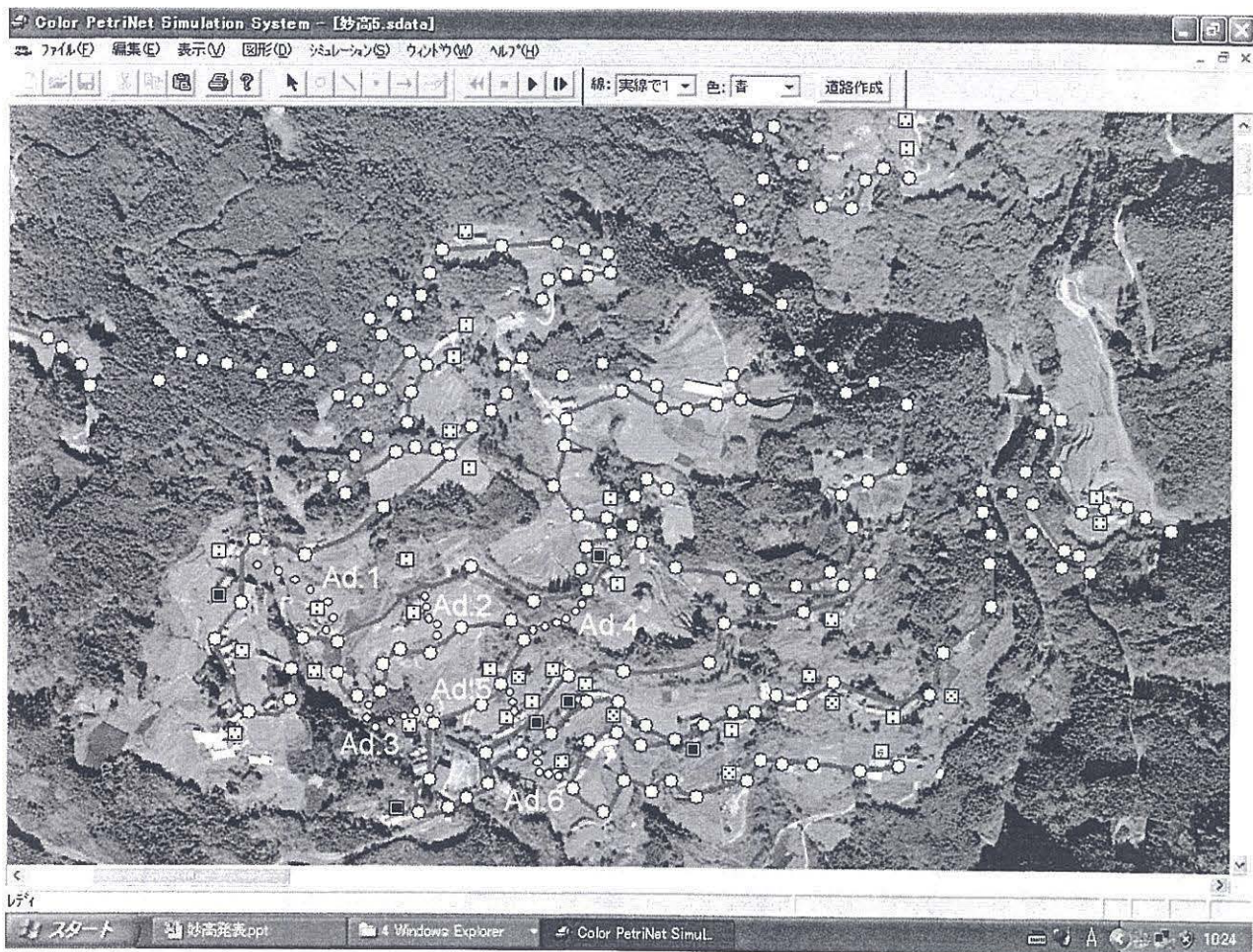


図-6-4-2 住民アンケートによる徒歩専用経路の追加

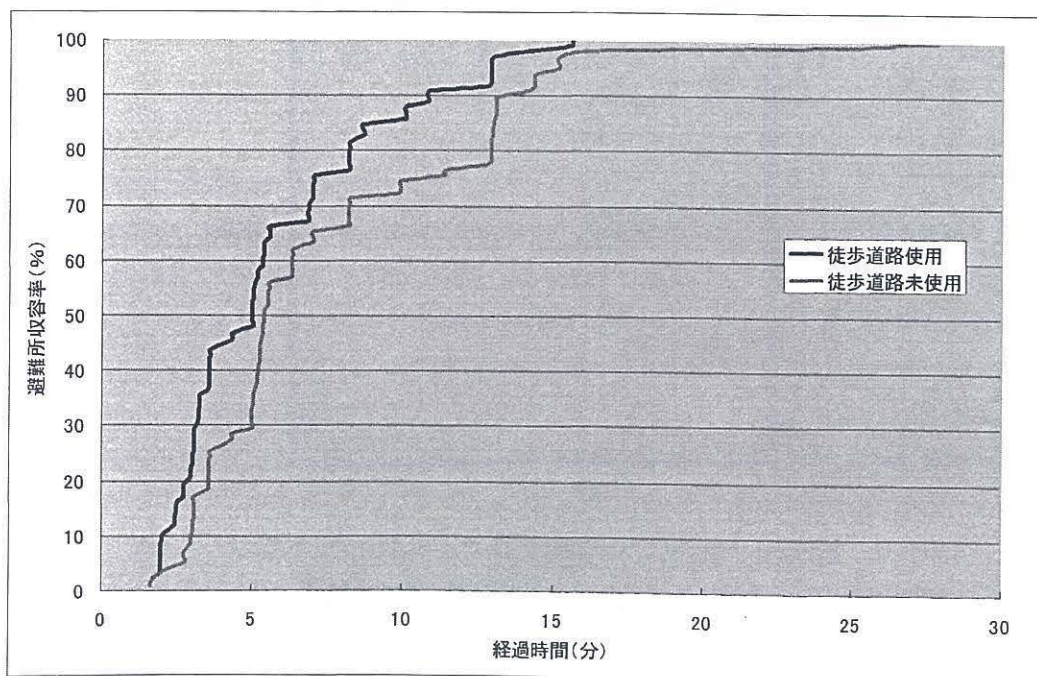


図-6-4-3 追加経路の有無による避難収容率の比較

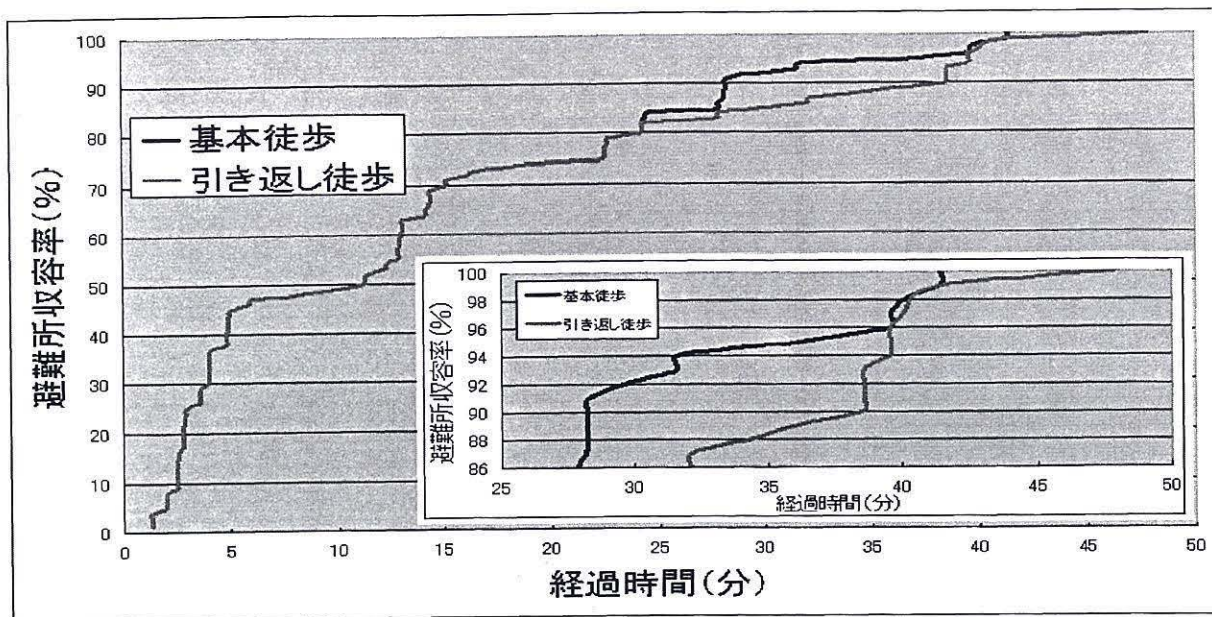


図-6-4-4 障害と情報の有無による避難収容率の比較

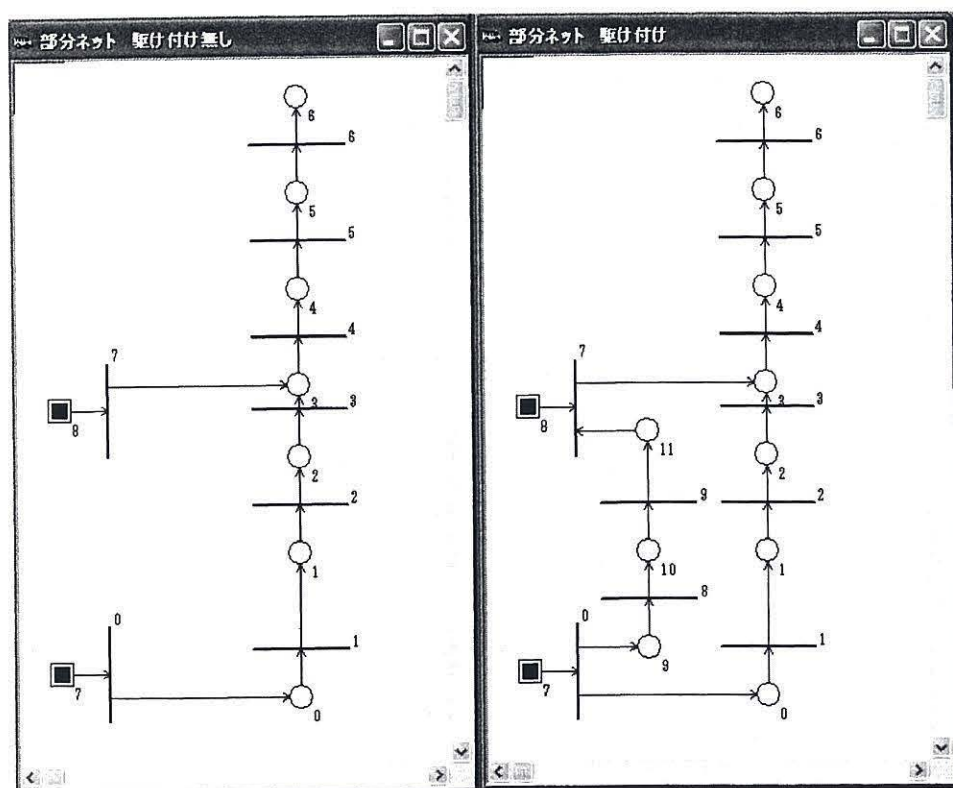


図-6-4-5 駆けつけ互助ネットの提案

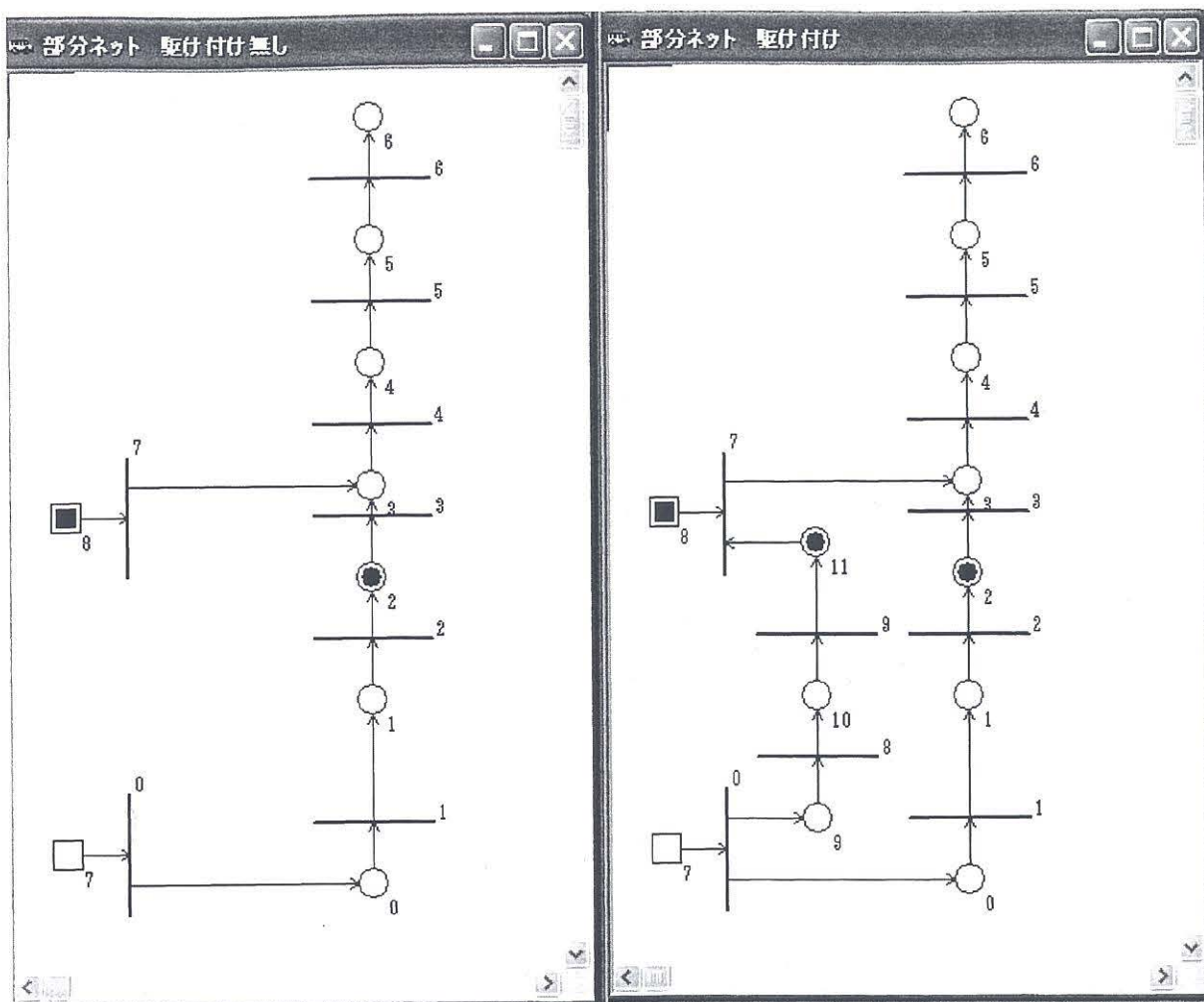


図-6-4-6 駆けつけ互助ネットの適用（1）

（2）行政によるシナリオ想定

行政は近年、避難に関して、従来の避難勧告、避難指示に加えて、避難準備を定めた。この目的は、災害が発生する前に、災害弱者を早めに避難させることである。そこで、行政による避難シナリオとして、全員が避難するケースと、阻害があった場合の情報の有無（ない場合は阻害箇所から引き返す）の計算事例を図-6-4-4に示す。この事例では、画面中央左に位置する西村橋が使用できないケースを想定しており、通行不可の情報がない場合、避難完了まで、7分程度の差が生じることがわかる。この結果より、避難準備を受けて十分な情報提供がなされた場合、避難完了時間に7分程度の影響を与える事が分かる。

（3）互助ネットの記述と全体ネットへの追加

住民アンケートより、高齢者世帯、老人独居世帯のため、要援護による避難を求めている世帯が16%ある。そこで、図-6-4-5に用援護者のための互助ネット（駆けつけネット）を提案する。図-6-4-5の黒四角のプレイス8が、独居世帯老人と仮定する。この要援護者を、黒四角のプレイス番号7が、8のプレイスに駆けつけて、一緒に避難する互助ネットを示している。すなわち、11のプレイスにトークンが打たれるまで、8のプレイスの独居老人は待機し、プレイス11のプレイスタイマが消費されると、トランジション7の発火により、プレイス3に二つ（二人）のトークンが打たれ、進行方向に一緒に避難を行う。図6-4-7の駆けつけ

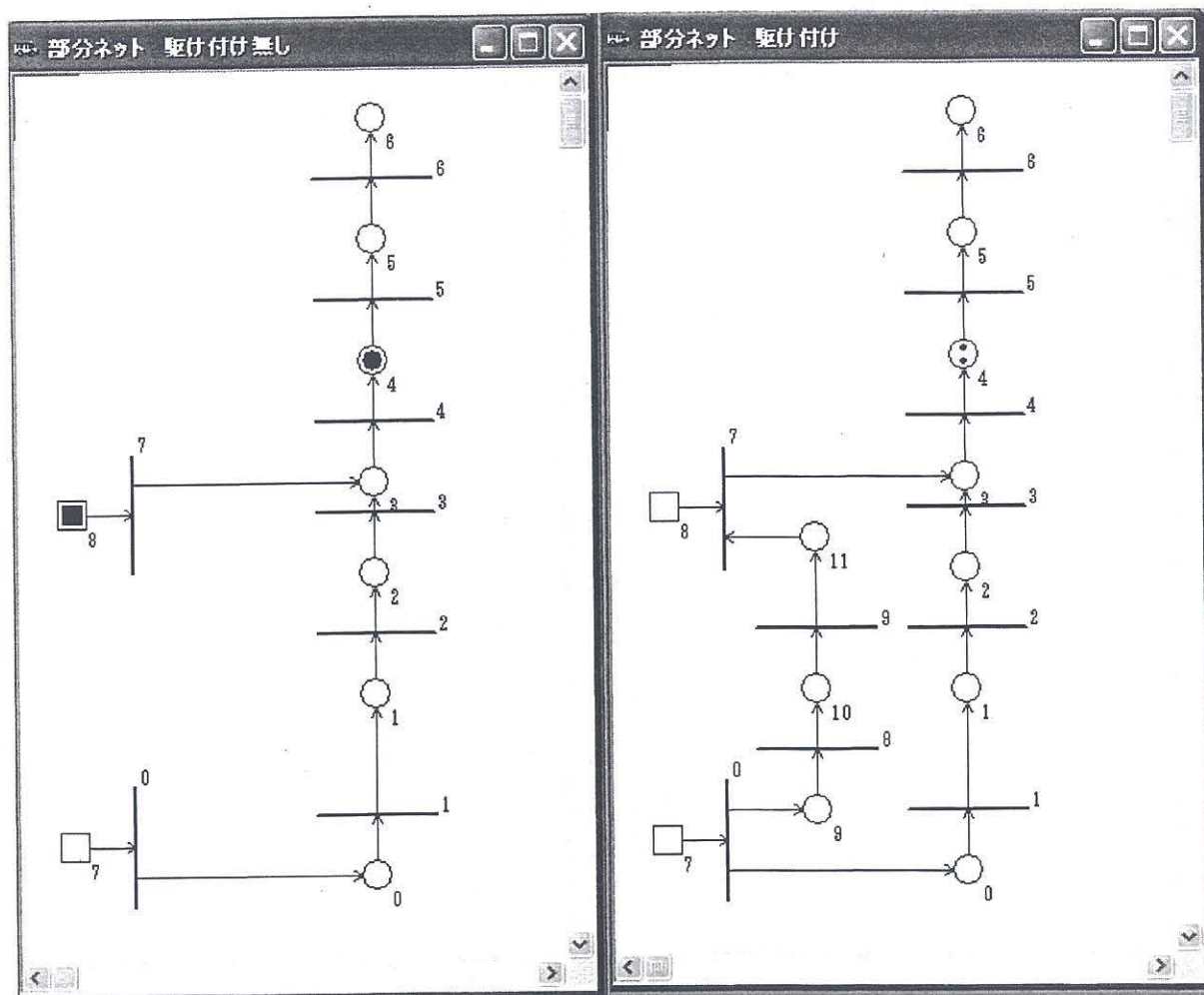


図-6-4-7 駆けつけ互助ネットの適用 (2)

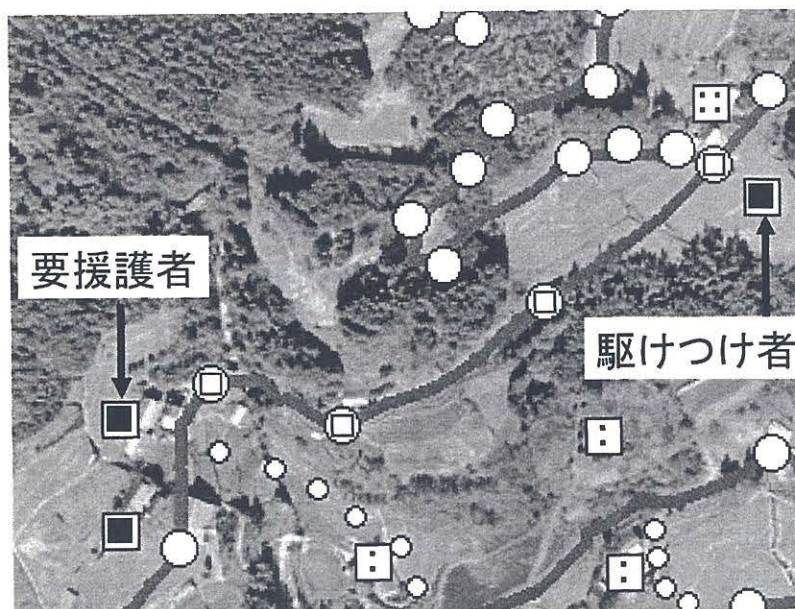


図-6-4-8 駆けつけネットの実ネットへの結合

互助ネットの適用（２）では、到着した駆けつけ者と要援護者が、７のトランジションの発火に伴い、プレイス３に移動していることが確認できる。

図－６・４・８ は、駆けつけネットを図－６・４・２ の全体のペトリネットの一部に結合したネットを表している。図－６・４・２ の右側の世帯が、図左斜め下の要援護者に駆けつけ、一緒に避難するネットの結合を表している。実線上の、四角と丸が重なったプレイスは、駆けつけ者の移動プレイスを表している。

6. 5 あとがき

本稿では、中山間地域の避難計画を考える上、道路の形状や、勾配など、避難速度に影響を与える要因に着目し、プローブデータより道路形状、勾配によって、ペトリネットの入力形である、プレイスの配置、プレイスタイマの自動算定のためのシステム開発を行った。さらに、プローブデータの緯度経度と、背景画像に用いる地図データのマッチングのための座標変換システムを開発し、従来、背景画像に手作業で配置していたプレイスを自動的に配置することが可能となった。この、ペトリネット入力系システムの改良により、新規データ作成の効率が大幅に向上し、また、新たな避難経路の追加も容易となった。

避難に関する住民アンケートより、住民の中には避難しない人が16%いることや、要援護の必要性を感じている住民も多いことが明らかになった。さらに、著者らが想定した経路以外の、徒歩専用道路を利用するといった、あらたな6つの経路が明らかになった。これらの経路については、携帯GPSを用いて、緯度・経度・高度情報を採取し、開発したシステムを用いて、ペトリネット入力データを作成し、基本ネットに追加を行った。以上の条件を与えたシナリオ・シミュレーションを実行し、収容率の観点からの考察を行った。最後に、要援護者のための駆けつけネットの基本ネットを提案し、全体ネットへの組み込みについて活用事例を明示した。

今後、アンケートの詳細分析を行い、阻害シナリオや、全ての要援護者の組み込みといった、住民の意見を反映したシナリオ分析を行い、行政・専門家のシナリオとの比較分析を行い、意識や問題点の整理を行いたいと考えている。

6. 6 参考文献

- 1) 片田敏孝、及川康、田中隆司：災害時における住民への情報伝達シミュレーションモデルの開発、土木学会論文集、No. 625/IV, pp. 1-13, 1999.
- 2) 木俣昇、鷺見育男：消防防災システムの阻害要因のペトリネットシミュレーションに関する基礎的研究、土木計画学・論文集、No. 14, pp. 393-400, 1997年9月。
- 3) 堀浩三、木俣昇：背景画像上での地震時緊急車両走行のペトリネットシミュレーション開発、土木計画学研究・講演集、Vol. 30, CD-ROM, 2004年11月。
- 4) ペトリネットによる背景画像上での建物内避難シナリオのシミュレーション研究、土木計画学研究・講演集、Vol. 30, CD-ROM, 2004年11月。
- 5) 南正昭、安藤昭、赤谷隆一：避難経路の高低差を考慮した津波避難計画の支援、土木計画学研究・講演集、Vol. 32, CD-ROM, 2005年11月。
- 6) 高野龍一、曾根岳志、木俣昇：ペトリネットによる背景画像上での地震時避難シナリオのシミュレーション法、土木学会中部支部研究発表会講演概要集、IV-60, pp. 419-420, 2005年3月。

- 7) 二神透、木俣昇：中山間地域の救急・避難計画支援のためのシナリオシミュレーションの開発、土木計画学研究・講演集、Vol. 30, CD-ROM, 2004年11月.
- 8) 二神透、木俣昇：中山間地域の救急・避難計画支援のための情報システム開発、土木情報利用技術講演集、Vol. 29, pp. 29-32, 2004年10月.
- 9) 愛媛県土木部土砂災害危険所マップ、<http://www.pref.ehime.jp/doboku/doboku2/kabetu/sabo/dmap/>

第7章 結 言

本研究では、背景画像上でのペトリネット構築法と、それを活用した地震防災計画の動的点検と再構成支援研究を展開してきた。まず、第2章では、この研究のベースとなるペトリネット手法について、その基礎概念と実践システムであるペトリネットシミュレータを整理・概説するとともに、地震防災計画を目的達成のシナリオとし、計画事象の連鎖とその障害のペトリネット記述法を提示した。そして、その方法が、ペトリネット形式の特徴であるネットの共通構造的な結合性、動的表現化の原理であるトランジションの発火則の共通性に基礎を置くもので、対象系のペトリネット記述がなされれば、それがそのまま動的記述に直結し、その駆動シミュレーションは、プログラムの変更なしで即時に実行可能となることを述べた。しかも、この駆動原理は、4つのルールを知るだけで、誰にでも容易に手動で運用・確認ができる簡明なものであることを紹介した。

その上で、確率的障害下での目的達成のシナリオの動的点検を論じ、障害要因への事前対策シナリオの追加ネットの再構築の方法を示した。さらに、この対策では、その進捗状況との関係で目的達成のシナリオの事象連鎖が障害されることも、再構築の駆動シミュレーションにより容易に点検できることを示し、事後対策シナリオの組み入れへの展開支援を示した。ここで示された事項は、第1章で地震防災計画の特徴とした計画目標年次の不在性、ないしは近々時での発効性を明白に示すものとなっている。このことが本研究の基本認識となるものであり、その明確な提示化は、本研究の方法論的な成果の一つであるだろう。

方法論的成果としては、対象系の記述力、取り扱い力を具体的に示せた点にもある。第3章と第4章では、消防防災システムを対象系としているが、第3章では、緊急車両走行の一般車交通による障害を、マイクロペトリネットとして記述・構成するということを試み、第4章では、司令部を含む消防防災システムの全体を取り扱い、広域での点検・再構築のために、マクロペトリネットとして記述・構成し、第3章のマイクロペトリネットをそのサブシステムとするということを試みており、記述力、取り扱い力が実用レベルにあることを示せたと思っている。

このことは、第5章と第6章での避難計画シナリオの取り扱いを通じても示せた。特に、ここでは、他のシステムとの連携化により、本研究の方式の記述力、取り扱い力を実証することができた。即ち、第5章では、火災延焼シミュレーションとの連携化によって、地震発生時期のシナリオシミュレーションへの組み込み法を提案し、このシナリオにより点検結果に大きな違いが出ることが示せた。第6章では、フローブカーと携帯GPSによる高度データ収集システムとの連携化により、中山間地計画に固有な地理的条件の反映化を実証可能なレベルに引き上げる可能性を示すことができたと考えている。今後、この面での充実化が進めば、災害応急対応計画のreal time 支援にも展開が可能となるだろう。

防災計画の点検・再構築の具体的内容面での成果としては、まず、第3章での緊急車両の交差点走行の支援システム提案を挙げることができるだろう。緊急車両の走行性の低下は、単路部よりも遥かに交差点部において大きい。消防員にとっても、交差点走行時の安全性は大きな不安となっており、その改善が求められている。本研究では、ITSによる信号制御案のペトリネット表現化を示し、その効果確認を行っている。全赤制御か青現示維持制御かの問題や、他方面から走行してくる緊急車両との関係等、検討課題は残されているが、技術的には実現可能であり、これら課題検討にも、精緻化を行った上での本方式の使用は有効となるだろう。

第4章では、司令部における地震時障害情報の収集と、それを活用した出動指令システムのネット提案を行った。これは、地震時火災の特徴がその同時多発性にあることと、利用可能な消防力に限界があることとが相まって、戦略的出動の検討は不可欠であり、そのシステムの点検評価の出発点となるものである。火災

延焼シミュレーションのシステム研究との連携化の下、地震時障害情報の収集システムの具体化と合せて、さらに早急に検討する必要がある課題であるといえよう。

第5章との関連では、火災の発生箇所によっては、指定避難場所以外への避難が生じことから、複数の避難場所の設定が、避難計画には望まれるといえよう。そして、このことの市街地避難訓練への反映化が望ましい。現在、単なる避難場所への移動訓練レベルから、避難路障害をシナリオに組み入れた訓練へと移行しつつあるが、火災想定でも障害箇所は固定的である。本研究では、障害箇所が固定的な、沿道の建物倒壊に伴う障害タイプとは別に、火災延焼に伴い障害箇所が拡大化するというシナリオ記述を行っている。このシミュレーションによって、地震発生時の気象条件、避難開始の難易度を考慮した点検が必要となるとした。これらの実避難訓練シナリオへの反映化が今後の課題となることを指摘しておきたい。

第6章では、今まで大きな関心が払われてこなかった中山間地の避難計画を扱った。先に述べたように、市街地が平地であるのに対して、傾斜地であり、また、高齢・独居者も多く、勾配による移動性に大きな問題がある。本研究では、避難経路の移動部ネットの構築を、単なる背景画像ではなく、その上にプローブカーと携帯GPSとにより採取した経路情報を重ねることで、この課題に対処している。まだまだ高度データの精度には問題はあるが、実データ上でのプレースタイマ設定を含む自動移動部ネットの構築化に目途がたったことは、本研究の大きな成果である。また、シミュレーション実行による住民による点検を実施し、寄せられた意見の組み入れも試みており、本方法論の実験場としても学ぶ点も多く、新規領域として有意義なものとなったと考えている。

本研究では、「地震防災計画の動的支援」を基本テーマとした。最後に、ここでいう“動的”の概念との関連での整理を行っておきたい。著者は、第1章序論で図1-1の模式図を示し、2つの時間軸との関係で地震防災計画の特徴について述べた。そして、本研究で取り上げる災害応急対応計画は、いずれも発災を契機に発効し、その時点を起点とする災害時時間軸上で展開・進展するとした。動的支援とは、まず、この時間軸上での展開・進展性という意味での“動的”の取り扱いを指す。この点については、ペトリネットによる支援下では、対象系の静的記述がそのまま動的記述へ直結し、プログラムの変更なしに、直ちに視覚的・動的シミュレーションの実行に繋がり、各章でこの意味での動的支援の実践・実行性は、十分に実証することができた。特に、災害時時間軸上での〈障害の生起〉の動的組み入れについては、第5章で、火災延焼シミュレーションとの連携化により、障害地点が変化するという動的取り扱いにも成果を上げている。

動的支援のもう一つの面は、図1-2に示したように、〈点検〉〈発議〉〈再構成〉という計画のプロセス面での展開・進展性との関連での“動的”取り扱いである。この点については、第4章で、司令部における災害情報の収集活動の追加を発議し、その組み入れ・再構成を実行し、その第一義的な意味での動的シミュレーションの実行性も示した。上述したように、この議論では、情報収集システムの具体化や、さらに、地震規模と初期情報の入手性といった災害時時間軸上での“動的”性の組み入れが、より現実的な戦略的出動の提示にも繋げるには、さらなる課題として残されている。

最後に、通常時時間軸との関連での動的支援である。即ち、災害予防計画である耐震・耐火化計画も防災訓練計画も、通常時時間軸上で進展・進捗する。応急対応計画は、それらの発災時点での進展・進捗状況を条件にして発効する。この意味での“動的”性の取り扱いについては、第4章あるいは第5章で、背景画像上でのペトリネット構築法との関連で、緊急路の周辺画像を取得し、参照画像と被害想定図を使用し、地震時障害の点検・評価結果により組み入れるとして、その実践形式を示した。この周辺画像取得の更新によって、予防計画の進展・進捗状況の変化を常に点検し、反映化支援することが可能となる。本研究では、この面での比較実行は不足しているが、通常時時間軸と災害時時間軸の交差上での地震防災計画論の展開・アピールには重要なテーマとなると考えている。